

Titre: Evaluation du potentiel de réactivité aux alcalis de granulats à
béton par un essai accéléré

Auteur: Alain Blanchette

Date: 1989

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Blanchette, A. (1989). Evaluation du potentiel de réactivité aux alcalis de
granulats à béton par un essai accéléré [Mémoire de maîtrise, Polytechnique
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/57933/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/57933/>

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITE DE MONTREAL

EVALUATION DU POTENTIEL DE REACTIVITE
AUX ALCALIS DE GRANULATS A BETON
PAR UN ESSAI ACCELERE

PAR

ALAIN BLANCHETTE

DEPARTEMENT DE GENIE MINERAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAITRE ES SCIENCES APPLIQUEES (M.SC.A.)

AVRIL 1989

© Alain Blanchette 1989

National Library
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.

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 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.

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 0-315-50195-2

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

EVALUATION DU POTENTIEL DE REACTIVITE
AUX ALCALIS DE GRANULATS A BETON
PAR UN ESSAI ACCELERE

présenté par: Alain Blanchette

en vue de l'obtention du grade de: 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. Benoit Durand, Ph. D.

RESUME

De nombreux travaux effectués ces deux dernières décennies concernant la réactivité aux alcalis de différents granulats québécois ont permis d'établir hors de tout doute que des granulats réactifs peuvent se retrouver partout au Québec. Au point de vue socio-économique, les dommages qu'ils ont provoqués sont pour le moins importants lorsque l'on considère la longévité écourtée de structures à grand achalandage comme les autoroutes, viaducs, ponts, quais, etc.

Du point de vue pratique, il existe plusieurs essais destinés à identifier les granulats réactifs aux alcalis du ciment. Cependant, en plus d'être souvent critiquées quant à leur véritable capacité à identifier les granulats réactifs, ces méthodes requièrent un temps d'essai de l'ordre de plusieurs mois, ce qui est nettement incompatible avec les besoins des entrepreneurs et de l'industrie.

En 1986, deux chercheurs sud-africains proposaient un essai accéléré qui permettait d'obtenir des résultats en quatorze jours. Il s'agit de barres de mortier entreposées à 80°C dans une solution de soude. Ces

conditions catalysent la réaction et les expansions causées par la formation de gel calco-alcalin-siliceux se produisent alors très rapidement.

Nous avons soumis plus de dix-sept granulats québécois à ce nouvel essai afin de vérifier son applicabilité à nos types de roches. En plus des barres de mortier, nous avons soumis des prismes de béton, confectionnés selon la norme A23.2-14A de l'ACNOR, aux mêmes conditions de cure. Rappelons que l'avantage des prismes de béton sur les barres de mortier réside dans le fait que la structure originale du granulat est conservée.

En comparant les résultats de ces essais accélérés avec ceux des essais traditionnels, effectués sur les mêmes granulats, nous avons déterminé que ces nouveaux essais peuvent remplacer, de façon avantageuse, les essais utilisés actuellement.

ABSTRACT

In the past two decades numerous studies on alkali reactivity of various Quebec aggregates have shown conclusively that reactive aggregates can be found everywhere. From a socio-economic point of view, the damages caused by the reaction are very important considering the shortened life span of structures submitted to heavy traffic such as highways, overpasses, bridges, docks, etc.

From a practical point of view, several methods exist to identify the alkali-reactive aggregates. However, besides being often criticized for their true ability to identify the reactivity of aggregates, these testing methods require several months of curing which is clearly incompatible with the needs of the industry.

In 1986, two South-African researchers proposed an accelerated test which allows good results to be obtained within 14 days. They used mortar bars kept at 80°C in a sodium hydroxyde solution. These curing conditions increase the rate of the reaction, and the expansion caused by the calco-alkaline-siliceous gel is generated very quickly.

In order to verify the applicability of this new test we tested more than 17 aggregates from the province of Quebec. In addition to mortar bars, concrete prisms, made according to the CSA A23.2-14A procedure were subjected to the same curing conditions. The advantage of using concrete prisms over mortar bars lies in the fact that the original structure of the aggregate is preserved.

Comparisons of the results of the accelerated tests and those of the traditional testing methods currently in use, show that the new tests can adequately replace the existing ones.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Jean Bérard, Ph. D., professeur agrégé au département 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 cette étude.

Je tiens à remercier Hydro-Québec pour son soutien financier lors de cette étude et tout particulièrement M. Guy Larocque, Ing. de la section sécurité des barrages.

Je désire remercier le Ministère des Transports du Québec pour son soutien technique et financier et tout particulièrement MM. Guy Fréchette, Ing. et Guy Dallaire, Ing.

Je désire également exprimer toute ma reconnaissance envers M. Benoit Durand, Ph. D., qui tout au long des travaux reliés à cette étude, a été d'une aide inestimable.

Finalement, je désire remercier le personnel de l'Ecole Polytechnique et tout particulièrement le personnel des départements de Génie Minéral et de Génie Civil.

TABLE DES MATIERES

	PAGE
RESUME.....	iv
ABSTRACT.....	vi
REMERCIEMENTS.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xx
CHAPITRE I- Introduction.....	1
I.1- Historique.....	1
I.2- Problématique.....	2
I.3- Présentation de l'étude.....	6
CHAPITRE II- La réaction alcalis-granulats.....	11
II.1- Le ciment portland et les alcalis.....	11
II.1.1- Fabrication et composition du ciment.....	11
II.1.2- Formes des alcalis.....	12
II.2- Mécanismes de réaction.....	15
II.2.1- Réaction entre la silice et les alcalis.....	15
II.2.2- Rôle du Ca(OH)_2	20
II.3- Produits de réaction.....	23
II.4- Intensité de la réaction.....	26
II.5- Types de granulats réactifs.....	30

	PAGE
CHAPITRE III- Revue des essais.....	34
III.1- Les essais normalisés.....	34
III.1.1- L'examen pétrographique.....	34
III.1.2- L'essai chimique (ASTM C-289).....	35
III.1.3- L'essai avec barres de mortier (ASTM C-227).....	39
III.1.4- L'essai avec mini-prismes de roches (ASTM C-586).....	43
III.1.5- L'essai avec prismes de béton (ACNOR A23.2-14A).....	45
III.2- Nouvelles méthodes d'essais.....	47
III.2.1- Essai chimique de changement de volume.....	47
III.2.2- Essai Duggan.....	49
III.2.3- Essais à l'autoclave.....	52
III.2.4- Essai accéléré par durcissement dans une solution de NaOH.....	54
III.2.5- Barres immergées dans une solution de NaCl.....	54
III.2.6- Essai accéléré de Oberholster et Davies.....	55
III.3- Evaluation des nouveaux essais.....	56
CHAPITRE IV- Les granulats.....	58
IV.1- Choix des granulats.....	58
IV.2- Techniques d'échantillonnage.....	61
IV.3- Etude pétrographique des granulats.....	62
CHAPITRE V- L'essai accéléré.....	87
V.1- Historique de l'essai.....	87

	PAGE
V.2- Evaluation de l'essai.....	88
V.2.1- Impact du temps de mesure.....	89
V.2.2- Evolution de la solution de NaOH.....	92
V.2.3- Impact de la normalité de la solution.....	94
V.2.4- Impact du rapport eau/ciment.....	97
V.2.5- Influence des contenants.....	100
V.3- Mode opératoire.....	103
V.3.1- Essai accéléré avec barres de mortier.....	103
V.3.2- Essai accéléré avec prismes de béton.....	106
 CHAPITRE VI- Les résultats.....	 110
VI.1- Résultats des essais normalisés.....	110
VI.1.1- ASTM C-289.....	110
VI.1.2- ASTM C-227.....	112
VI.1.3- ACNOR A23.2-14A.....	117
VI.2- Résultats des essais accélérés.....	122
VI.2.1- Essai accéléré sur barres de mortier.....	122
VI.2.2- Essai accéléré sur prismes de béton.....	127
VI.3- Le cas des dolomies.....	132
VI.4- Les produits de réaction.....	139
 CHAPITRE VII- Discussion.....	 148
VII.1- Relations entre les essais.....	148

	PAGE
CHAPITRE VIII- Conclusion.....	164
VIII.1- Situation actuelle.....	164
VIII.2- Synthèse des facteurs influençant les essais accélérés.....	167
VIII.3- Synthèse des résultats et recommandations....	167
BIBLIOGRAPHIE.....	177
ANNEXE A- Tableaux présentant l'ensemble des données.....	187

LISTE DES FIGURES

FIGURE:	PAGE
1-Evolution du contenu en alcalis des ciments produits au Canada.....	5
2-Quantité de silice dissoute en fonction du pH.....	6
3-Différence entre une silice bien cristallisée et une silice faiblement cristallisée.....	18
4-Attaque d'une silice peu ou pas cristallisée par des hydroxyles d'alcalis.....	19
5-Vacuole d'une pâte de ciment remplie de gel calco-alcalin-siliceux.....	24
6-Veinule dans un granulat calcaire remplie de gel calco-alcalin-siliceux.....	24
7-Couronne de réaction autour d'un fragment d'orthoquartzite.....	25
8-Présence de chert et d'opale dans un calcaire.....	32
9-Quartz à extinction ondulante examiné au microscope polarisant.....	32
10-Graphique où l'on rapporte les résultats de l'essai ASTM C-289.....	37
11-Barres de mortier utilisées lors de l'essai ASTM C-227.....	40
12-Réceptacle utilisé pour de l'essai ASTM C-227.....	40
13-Mini-prismes de dolomie, selon la norme ASTM C-586...	44
14-Appareil de mesure des mini-prismes.....	44
15-Prismes de béton selon la norme ACNOR A23.2-14A.....	46
16-Réceptacle utilisé pour la cure de la norme ACNOR A23.2-14A.....	46
17-Cycle de l'essai Duggan.....	50

FIGURE:	PAGE
18-Sites d'échantillonnage.....	59
19-Photographie du calcaire d'Ottawa en lame mince. (lumière polarisée, 32X).....	64
20-Photographie du granulât d'Ottawa en lame mince, On observe la présence de chert. (lumière polarisée, 72X).....	64
21-Photographie du calcaire de Hull en lame mince où l'on observe des fossiles partiellement silicifiés. (lumière polarisée, 32X).....	67
22-Photographie de la dolomie de Coteau-du-Lac en lame mince où l'on observe du chert. (lumière polarisée, 72X).....	67
23-Photographie du granulât de Beauharnois en lame mince. Le ciment siliceux est en continuité optique avec les grains de quartz. (lumière polarisée, 72X).....	69
24-Photographie du grès dolomitique en lame mince. (lumière polarisée, 72x).....	69
25-Photographie du calcaire de St-Jean en lame mince où l'on observe du chert. (lumière polarisée, 72X).....	71
26-Photographie de la syénite de Varennes en lame mince. (lumière polarisée, 72X).....	71
27-Photographie du calcaire dolomitique de Laval en lame mince. (lumière polarisée, 32X).....	74
28-Photographie de gneiss oillé de St-Hyppolyte en lame mince. (lumière polarisée, 32X) ..	74
29-Photographie du calcaire de St-Jacques en lame mince où l'on observe du chert et de la calcédoine. (lumière polarisée, 32X).....	76
30-Photographie du calcaire de Berthier en lame mince. (lumière polarisée, 32X).....	76

FIGURE:	PAGE
31-Photographie du calcaire de Trois-Rivières en lame mince où l'on observe de petits grains de quartz. (lumière polarisée, 32X).....	79
32-Photographie de la métavolcanique de St-Wenceslas en lame mince où l'on observe de petites laminations de quartz. (lumière polarisée, 72X).....	79
33-Photographie du basalte de St-Cyrille en lame mince où l'on observe que les amygdules sont remplies de calcite. (lumière polarisée, 72X).....	82
34-Photographie du schiste chloriteux de Sherbrooke en lame mince où l'on observe beaucoup de petits grains de quartz. (lumière polarisée, 32X).....	82
35-Photographie du tuf rhyolitique de Beauceville en lame mince. (lumière polarisée, 32X).....	84
36-Photographie du calcaire de Charlesbourg en lame mince où l'on observe de petits grains de quartz. (lumière polarisée, 32X).....	84
37-Photographie du calcaire de Chicoutimi en lame mince où l'on observe du chert et de la calcédoine. (lumière polarisée, 32X).....	86
38-Evolution de la normalité de la solution lors de l'essai accéléré.....	93
39-Impact de la normalité de la solution lors de l'essai accéléré avec barres de mortier.....	95
40-Impact de la normalité de la solution lors de l'essai accéléré avec prismes de béton.....	96
41-Impact du rapport eau-ciment sur les résultats de l'essai accéléré avec barres de mortier, granulats d'Ottawa et de Sherbrooke.....	98
42-Impact du rapport eau-ciment sur les résultats de l'essai accéléré avec barres de mortier, granulats de Trois-Rivières et de Berthier.....	99
43-Récipient utilisé lors de la cure de l'essai accéléré avec barres de mortier.....	101

FIGURE:	PAGE
44-Réceptient vertical utilisé lors de la cure de l'essai accéléré avec prismes de béton.....	102
45-Réceptient horizontal utilisé lors de la cure de l'essai accéléré avec prismes de béton.....	102
46-Appareil de mesure utilisé pour les barres de mortier.....	109
47-Appareil de mesure utilisé pour les prismes de béton.....	109
48-Résultats des essais ASTM C-289.....	111
49-Résultats des essais ASTM C-227, granulats d'Ottawa, Hull, Laval et Berthier.....	113
50-Résultats des essais ASTM C-227, granulats de Trois-Rivières, Côteau-du-Lac, St-Hyppolyte et Chicoutimi.....	114
51-Résultats des essais ASTM C-227, granulats de Beauceville, Varennes, Sherbrooke et St-Cyrille.....	115
52-Résultats des essais ASTM C-227, granulats de St-Jean, Beauharnois, St-Jacques, Charlesbourg et St-Wenceslas.....	116
53-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A, granulats d'Ottawa, Hull, Laval et Berthier.....	118
54-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A, granulats de Trois-Rivières, Côteau-du-Lac, St-Hyppolyte et Chicoutimi.....	119
55-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A, granulats de Varennes, Sherbrooke, St-Cyrille et Beauceville..	120
56-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A, granulats de St-Jean, Beauharnois, St-Jacques Charlesbourg et St-Wenceslas.....	121
57-Résultats des essais accélérés sur barres de mortier, granulats d'Ottawa, Hull, Laval et Berthier.....	123

FIGURE:	PAGE
58-Résultats des essais accélérés avec barres de mortier, granulats de Trois-Rivières, Côteau-du-Lac, St-Hyppolyte et Chicoutimi.....	124
59-Résultats des essais accélérés avec barres de mortier, granulats de Beauceville, Varennes, Sherbrooke et St-Cyrille.....	125
60-Résultats des essais accélérés avec barres de mortier, granulats de St-Jean, Beauharnois, St-Jacques, Charlesbourg et St-Wenceslas.....	126
61-Résultats des essais accélérés avec prismes de béton, granulats d'Ottawa, Hull, Laval et Berthier..	128
62-Résultats des essais accélérés avec prismes de béton, granulats de Trois-Rivières, Côteau-du-lac, St-Hyppolyte et Chicoutimi.....	129
63-Résultats des essais accélérés avec prismes de béton, granulats de Beauceville, Varennes, Sherbrooke et St-Cyrille.....	130
64-Résultats des essais accélérés avec prismes de béton, granulats de St-Jean, Beauharnois, St-Jacques, Charlesbourg et St-Wenceslas.....	131
65-Mini-prismes de dolomies ayant subit différentes cures: de gauche à droite, eau distillée à 80 ⁰ C, NaOH 1N à 80 ⁰ , 1 mois, 2 mois, 3 mois et 4 mois.....	135
66-Mini-prismes de dolomie après une cure d'un mois dans de la soude 1N à 80 ⁰ C.....	136
67-Mini-prisme de dolomie après une cure de trois mois dans de la soude 1N à 80 ⁰ C.....	136
68-Mini-prisme de dolomie après une cure de quatre mois dans la soude 1N à 80 ⁰ C.....	137
69-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai accéléré avec le calcaire d'Ottawa. (190X).....	142
70-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 69.....	143

FIGURE:	PAGE
71-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai accéléré avec le calcaire d'Ottawa. (230X).....	143
72-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 71.....	143
73-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai accéléré avec le calcaire d'Ottawa. (1200X).....	144
74-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 73.....	144
75-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai ASTM C-227 avec le calcaire d'Ottawa. (1400X).....	145
76-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 75.....	145
77-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai ASTM C-227 avec le calcaire d'Ottawa. (190X).....	146
78-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 77.....	146
79-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai ASTM C-227 avec le calcaire d'Ottawa, (250X).....	147
80-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 79.....	147
81-Relation entre les résultats de l'essai ASTM C-227 et l'analyse pétrographique.....	151
82-Relation entre les résultats de l'essai ACNOR A23.2-14A et l'analyse pétrographique.....	153
83-Relation entre les résultats de l'essai accéléré sur barrés de mortier et l'analyse pétrographique.....	154
84-Relation entre les résultats de l'essai accéléré sur prismes de béton et l'analyse pétrographique....	156

FIGURE:	PAGE
85-Relation entre l'essai accéléré sur barres de mortier et l'essai ASTM C-227.....	157
86-Relation entre l'essai accéléré sur prismes de béton et l'essai ASTM C-227.....	158
87-Relation entre l'essai accéléré sur barres de mortier et l'essai ACNOR A23.2-14A.....	159
88-Relation entre l'essai accéléré sur prismes de béton et l'essai ACNOR A23.2-14A.....	160
89-Relation entre l'essai ACNOR A23.2-14A et l'essai ASTM C-227.....	161
90-Relation entre l'essai accéléré sur prismes de béton et l'essai accéléré sur barres de mortier.....	162
91-Relation entre les résultats de l'essai accéléré sur barres de mortier et l'analyse pétrographique.....	172
92-Relation entre les résultats de l'essai accéléré sur prismes de béton et l'analyse pétrographique.....	173

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU:	PAGE
1-Etapes du projet de recherche.....	10
2-Types de réaction alcalis-granulat.....	31
3-Sites d'échantillonnage.....	60
4-Caractéristiques du mélange utilisé lors des essais sur barres de mortier.....	104
5-Caractéristiques du mélange utilisé lors des essais sur prismes de béton.....	107
6-Essai d'expansion de mini-prismes de dolomie.....	134
7-Réactivité des granulats.....	149
8-Synthèse des résultats.....	171
9-Etapes à suivre lors de l'étude d'un granulat à béton.....	176
A.1-Résultats des essais ASTM C-227.....	188
A.2-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A.....	191
A.3-Résultats des essais accélérés sur prisme de béton.....	194
A.4-Résultats des essais accélérés sur barres de mortier.....	197
A.5-Résultats des essais ASTM C-289.....	200
A.6-Résultats des essais accélérés sur barres de mortier avec variation de la normalité de la solution.....	201
A.7-Résultats des essais accélérés sur prismes de béton avec variation de la normalité de la solution.....	201

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1: HISTORIQUE

Aujourd'hui reconnu internationalement, le phénomène des réactions alcalis-granulat fût reconnu pour la première fois il y a maintenant près d'un demi-siècle dans un barrage de la Californie par E.T. Stanton, (Stanton, 1940). Depuis lors, sept conférences internationales ont eu lieu sur le sujet, dont la plus récente à Ottawa en août 1986.

Au Québec, c'est en 1957 que E. Chauret (Chauret, 1957), ingénieur civil à l'emploi de la ville de Montréal, indiqua pour la première fois la possibilité d'une réactivité alcalis-granulat impliquant un granulat calcaire de la région de Montréal. De nombreux travaux effectués ces deux dernières décennies concernant la réactivité aux alcalis de différents granulats québécois (Durand, 1969, Durand et Bérard, 1974, Prud'Homme, 1981, Bérard, 1980, 1982, 1985, Abet, 1984, Houde, 1986, Durand,

1986, 1989, Bérubé et Fournier, 1985, 1986, 1987), ont permis d'établir hors de tout doute que ces granulats peuvent se retrouver partout au Québec.

Au point de vue économique, les dommages provoqués ont été pour le moins importants: le barrage de Beauharnois, le port de Melocheville, le barrage Rivière-des-Prairies, l'évacuateur de Côte Sainte-Catherine, l'hôtel de ville de Trois-Rivières et l'autoroute 73 à Bécancour pour ne citer que quelques cas. En fait, de la Gaspésie jusqu'à Hull, de Sherbrooke jusqu'à l'Abitibi, on rencontre des structures affectées par les réactions alcalis-granulat.

I.2: PROBLEMATIQUE

Un béton est fabriqué à partir de ciment, de sable, de granulats et d'eau. Le volume que les granulats occupent est généralement de l'ordre de 60%. Lors du gâchage, l'eau et le ciment réagissent pour former des silicates de calcium et d'aluminium hydratés qui constituent la pâte de ciment où baignent le sable et le granulat. La résistance de l'ensemble sera fonction de la résistance:

- 1) de la pâte de ciment.

- 2) des granulats fins et grossiers.
- 3) du lien entre les granulats et la pâte de ciment hydratée.

Dans la majorité des cas, il règne à l'intérieur du béton une stabilité physico-chimique qui se maintient sur une grande période. Dans des conditions normales d'exposition, un béton possède une espérance de vie de cinquante ans et plus. Une exception à cette règle est celle où les granulats utilisés, face à un milieu alcalin et fortement basique, se révèlent instables à cause de réactions chimiques avec les alcalis présents dans le liquide interstitiel. Concrètement, les réactions alcalis-granat qui se produisent au sein d'un béton contenant des granulats réactifs se manifestent par le développement de contraintes supérieures à la résistance intrinsèque du béton; ces bétons prennent de l'expansion et se fissurent.

Il est donc primordial de pouvoir prévoir le comportement des granulats avant leur utilisation dans le béton.

L'évaluation de nouveaux granulats pour construire de nouvelles structures pose un problème de taille: comment

arriver à concilier la réalisation d'un projet dans un délai de temps raisonnable alors que l'essai le plus fiable actuellement pour déterminer le potentiel de réactivité d'un granulats demande une cure de plus d'un an? Certains essais rapides normalisés tel que l'essai ASTM C-289 donnent des résultats mitigés et ne détectent pas tous les granulats réactifs. Les conditions de ces essais sont de plus très peu représentatifs des conditions réelles d'un vrai béton.

De plus, dans les zones urbaines, les sources de granulats actuellement utilisées devront éventuellement dans plusieurs cas être remplacés par de nouvelles sources, (Gratten-Bellew et al., 1978). On devra alors se tourner vers d'autres sources moins bien connues et souvent de moins bonne qualité que celles utilisées jusqu'alors. On devra donc effectuer des études de caractérisation de ces nouvelles sources afin d'éviter le même genre d'erreurs qui ont été commises par le passé. On devra alors posséder des outils sûrs, rapides et fiables.

Mentionnons aussi que le contenu en alcalis des ciments portlands produits au Canada est plutôt élevé et connaît présentement une tendance vers une augmentation (voir figure 1).

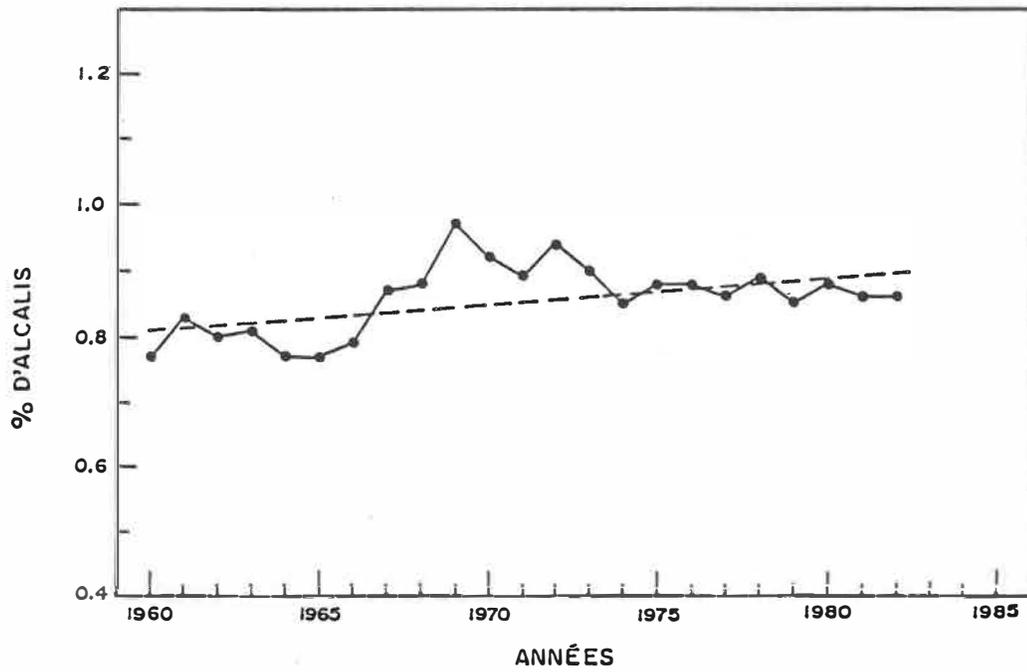


Fig. 1-Evolution du contenu en alcalis des ciments produits au Canada. (D'après Grattan-Bellew et al., 1978)

Il s'ensuit que des granulats considérés maintenant comme étant acceptables pourraient devenir impropres à être utilisés dans des bétons exposés à des conditions d'humidité élevée.

Il existe donc un besoin pressant de développer un essai rapide et fiable afin de déterminer le potentiel de réactivité des granulats. L'industrie serait ainsi libérée d'un problème très contraignant car celle-ci dispose rarement d'un an pour évaluer ses granulats. Des granulats préalablement mis de côté pour des granulats plus sûrs mais inévitablement plus coûteux pourraient désormais être soumis à cet essai rapide et fiable. Une économie de temps et d'argent serait réalisée à coup sûr. A l'heure actuelle, il n'existe aucun essai normalisé qui s'applique à tous les types de roches et qui permette d'obtenir des résultats en moins d'un an.

I.3: PRESENTATION DE L'ETUDE

Au début de 1986, Oberhloster et Davies rapportaient les résultats de l'application d'une nouvelle méthode d'essai accéléré de barres de mortier basée sur la norme

ASTM C-227. Grâce à des conditions d'entreposage plus sévères, soit 80°C au lieu de 38°C, et grâce à l'immersion des échantillons dans une solution de NaOH 1N au lieu d'être placés à 95% d'humidité relative, les expansions obtenues habituellement en six mois sont obtenues en quatorze jours. Les chercheurs concluent que leurs travaux effectués sur une période de trois ans démontrent que cet essai est rapide et fiable pour la détermination du potentiel de réactivité des granulats, et ce, à condition que les précautions d'usage soient prises dans l'exécution de l'essai.

A partir de ces résultats, nous nous sommes proposés d'appliquer cet essai accéléré à des granulats québécois afin d'en évaluer la valeur. Au total 17 granulats québécois, représentatifs des différents types de granulats utilisés ici, ont été soumis à ces nouvelles conditions d'exposition. Nous avons apporté une attention toute particulière aux carbonates étant donné leur grande utilisation. Plusieurs granulats dont le comportement dans le béton est bien connu, ont aussi fait l'objet de notre étude, afin de connaître leur comportement face à ce nouvel essai.

Nous avons également utilisé ces nouvelles conditions

d'entreposage pour des prismes de béton fabriqués conformément à la norme ACNOR A23.2-14A, ceci afin de comparer ces résultats avec ceux obtenus avec les barres de mortier. Rappelons que l'avantage des barres est qu'elles ne requièrent que peu de matériel pour effectuer l'essai mais que l'avantage des prismes réside dans le fait que les échantillons représentent toutes les caractéristiques d'un vrai béton. Puisque ces deux types d'échantillons sont très populaires auprès des utilisateurs de béton et des laboratoires de contrôle, ces deux types d'échantillons devaient, d'après nous, être utilisés pour cet étude.

L'essai accéléré sur prismes de béton est aussi actuellement expérimenté par une équipe de chercheurs Australien, (Shayen et al., 1988).

En plus d'utiliser les conditions de cure proposées par Oberholster et Davies, nous avons tenté différents essais en faisant varier ces conditions. Nous avons vérifié, entre autres, l'impact de la normalité de la solution, du rapport eau-ciment et du temps de mesure sur les résultats.

Les granulats ont aussi été soumis à la batterie

d'essais normalisés, i.e., ASTM C-289, ASTM C-227 et ACNOR A23.2-14A. L'essai ASTM C-586 fût utilisé au besoin pour spécifier la réactivité d'un granulat. Une analyse pétrographique, selon la norme A23.2-15A, a été effectuée sur chaque granulat afin de vérifier si les résultats des essais étaient cohérents avec la nature des granulats.

En conclusion, nous tenterons de voir s'il y a corrélation entre les résultats des différents essais et si un essai accéléré peut être appliqué à l'ensemble des granulats québécois.

La tableau 1 représente schématiquement les étapes de cette étude.

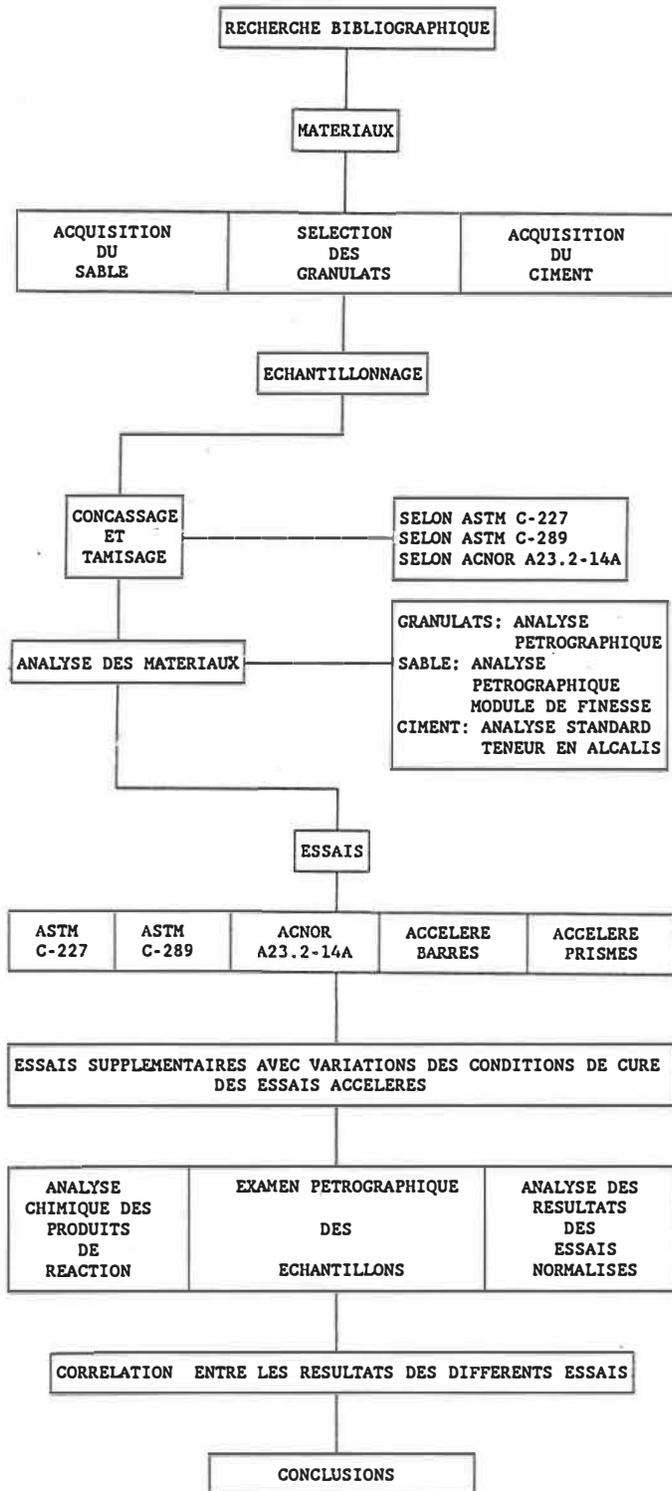


Tableau 1: Etapes du projet de recherche.

CHAPITRE II

LA REACTION ALCALIS-GRANULAT

II.1: Le ciment portland et les alcalis.

II.1.1: Fabrication et composition du ciment portland

Le ciment portland est fabriqué à partir de pierre calcaire et de shale, qui par un procédé de broyage et de fusion partielle sont transformés en quatre composantes principales:

COMPOSANT	FORMULE CHIMIQUE	FORMULE ABREGEE
1. Silicate tricalcique	3CaO SiO_2	C_3S
2. Silicate dicalcique	2CaO SiO_2	C_2S
3. Aluminate tricalcique	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A
4. Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ Fe_2O_3	C_4AF

Pour un ciment portland de type 10, la composition moyenne sera de 49% de C_3S , 25% de C_2S , 11% de C_3A et de

8% de C_4AF . On retrouvera aussi des oxydes de magnésium et de calcium et les alcalis, sodium et potassium.

Du gypse est par la suite ajouté en petite quantité afin de contrôler la vitesse d'hydratation du C_3A . La composition chimique moyenne du ciment portland est la suivante: CaO 63%, SiO_2 22%, Al_2O_3 5%, Fe_2O_3 2%, MgO 3% et les alcalis jusqu'à 1.4%. Il est à noter que les alcalis sont présents à l'origine dans la matière première sous forme de feldspaths et d'argiles et que ceux-ci ne sont pas éliminés, sinon qu'en partie, au cours du processus de fabrication du ciment. Les teneurs en alcalis des ciments produits au Québec sont de l'ordre de 0.8% à 1.2% Na_2O équivalent. Notons que ces pourcentages sont plutôt élevés; on considère qu'un ciment est à faible teneur en alcalis s'il contient moins que 0.6% Na_2O équivalent. Récemment, aux Etats-Unis on obtenait un ciment à 0.4%. (Struble et Diamond, 1987).

II.1.2: Formes des alcalis

Dans le ciment portland, on retrouve les alcalis dans trois types de composés (Pollitt et Brown, 1964). Ils sont sous forme de sulfates de Na et de K, dans les aluminates

et ferro-aluminates tétracalciques et finalement en substitution dans les silicates de calcium. Il semble que les ions Na et K soient interchangeable. Cependant plusieurs études démontrent, (Diamond, 1975, McCoy, 1978, Dobie, 1985, Struble et Diamond, 1985), que d'un ciment à un autre, les proportions des composés dans lesquels on retrouve les alcalis varient énormément. D'après McCoy (1978), les formes sous lesquelles on retrouve les alcalis dépendent de trois facteurs:

- 1) composition de la matière première,
- 2) condition de chauffage lors de la fabrication du ciment et type de combustible,
- 3) taux de refroidissement du clinker.

Ceci est un fait important, car les alcalis sous forme de sulfates sont beaucoup plus solubles que sous les autres formes.

Toujours d'après McCoy (1978), des études effectuées sur des ciments portland type 10 fabriqués aux Etats-Unis ont donné des pourcentages d'alcalis solubles variant entre 10 et 60% lorsque soumis à la norme ASTM C-114, (Standard Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement).

Les autres formes sous lesquelles on retrouve les alcalis sont solubles à des degrés divers. D'après Shin et Glasser (1983) et Regourd et al. (1981), la deuxième source d'alcalis proviendrait des C_3A et C_4AF . Finalement, la capacité des silicates de calcium à retenir les alcalis serait inversement proportionnelle à leur teneur en Ca (Stark et Bhatti, 1985) et serait, en général, forte.

Mentionnons que les alcalis peuvent aussi provenir d'autres sources que de la matière première, soit des sels de déglacage et de l'eau de mer par exemple. Stark et Bhatti (1985) ont aussi démontré que les granulats pouvaient eux-mêmes fournir les alcalis. Van Aardt et Visser (1977) ont démontré que les feldspaths relâchaient leurs alcalis en présence d'une solution de $Ca(OH)_2$, ceci à haute température.

Les alcalis mis en solution se retrouvent dans le liquide interstitiel du béton et il semble qu'une fois en solution, ils n'auraient pas tendance à être fixés par les produits d'hydratation (Diamond 1975). Le liquide interstitiel que l'on retrouve dans les pores du gel et les pores capillaires du béton est donc constitué d'eau, n'ayant pas encore servi à l'hydratation, et d'ions Na, K, Ca, et SO_4 . Notons que ce liquide est hyperbasique, le

pH pouvant atteindre des valeurs de l'ordre de 13.0-13.5.

II.2: Mécanisme de réaction

II.2.1: Réaction entre la silice et les alcalis

Le liquide interstitiel du béton est donc alcalin, hyperbasique et sulfaté. Introduits dans un tel milieu, certains granulats peuvent subir une agression chimique plus ou moins importante selon leur composition et de l'état physico-chimique environnant. Ainsi, la silice sous forme de quartz bien cristallisé s'avère très stable, alors que les variétés peu cristallisées, telles que l'opale et le chert, réagissent rapidement dans un tel milieu (Wilding et al., 1977).

La silice faiblement cristallisée est dissoute en grande quantité lorsque le pH atteint des valeurs de 12.0-12.5. Ceci est illustré à la figure 2.

La réaction alcalis-silice est donc essentiellement une réaction base-acide (Dent-Glasser et Kataoka, 1981a) qui se produit dans un milieu contigu, d'où la fissuration

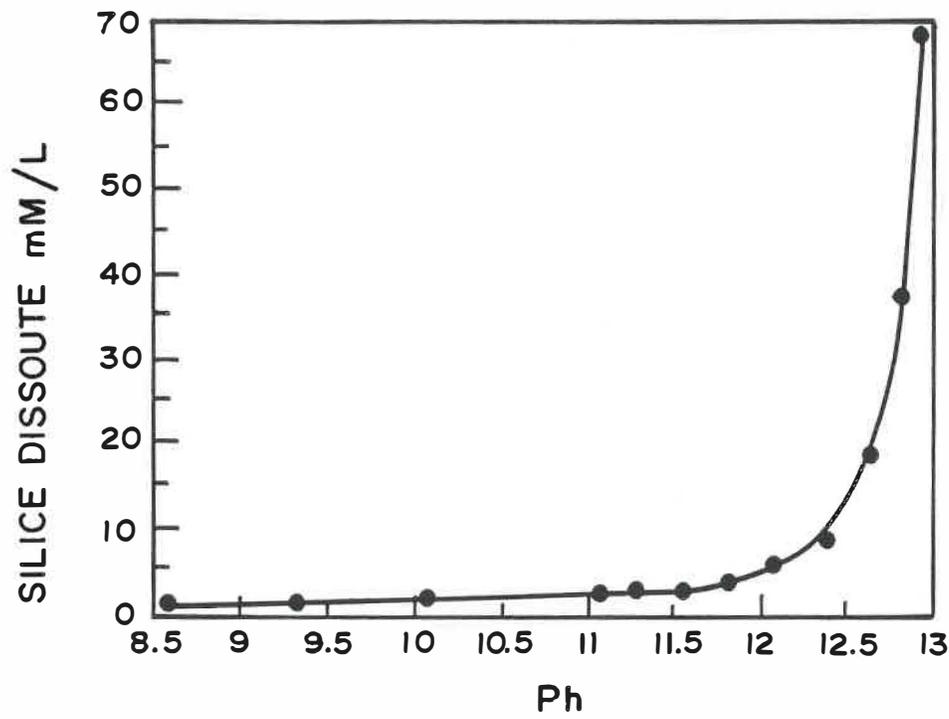


Fig. 2-Quantité de silice dissoute en fonction du pH. (D'après Ming-Shu et Su-Fen, 1980)

dans les cas graves.

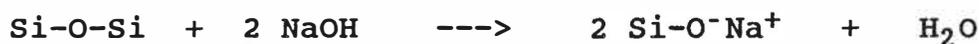
La figure 3 montre schématiquement les différences entre une forme de silice bien cristallisée et une qui ne l'est pas.

Sous sa forme peu cristallisée, les groupes hydroxyles (OH^-) de la solution interstitielle réagissent avec les groupes silanols acides (Si-OH) de la silice; ceci constitue la première étape de la réaction. L'équation de cette réaction est présentée ci-dessous.



L'atome de sodium vient ici balancer la charge créée sur l'oxygène terminal du groupe silanol (Dent-Glasser et Kataoka, 1981)

La deuxième étape de la réaction survient lorsque les ions hydroxyles vont s'attaquer aux ponts siloxanes (Si-O-Si). Ceci est exprimé par l'équation suivante:



La figure 4 schématise le processus.

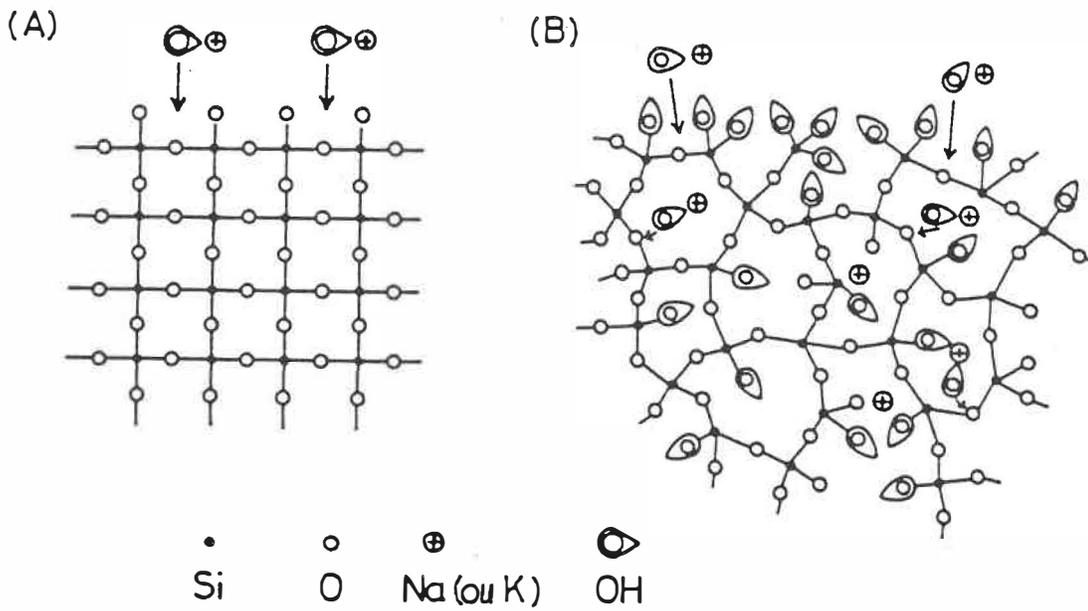


Fig. 3-Différence entre une silice bien cristallisée (en A) et une silice faiblement cristallisée (en B). (D'après Dent-Glasser et Kataoka, 1981a)

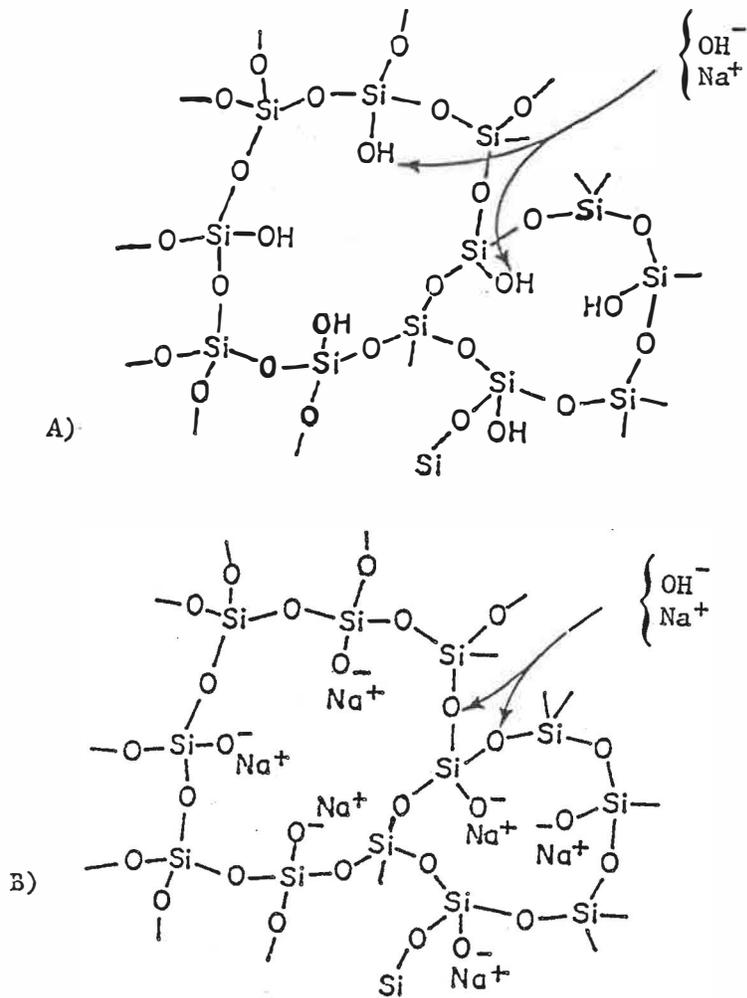


Fig. 4-Attaque d'une silice peu ou pas cristallisée par des hydroxyles d'alcalis. (D'après Dent-Glasser et Kataoka, 1981a)

La rupture des ponts siloxanes affaiblit la structure cristalline, ce qui augmente la capacité d'absorption des ions hydroxyles et alcalins. Ces ions pénètrent de plus en plus profondément dans la structure, et lorsqu'une réaction est enclenchée, le processus est irréversible et seule une carence en ions hydroxydes ou alcalins viendra mettre fin à la réaction.

II.2.2: Rôle du $\text{Ca}(\text{OH})_2$

On observe dans ce processus l'importance des ions hydroxyles dans le déroulement de la réaction. Ce rôle est important et l'on pourrait presque parler d'une réaction hydroxyles-silice, les alcalis ne venant en fait que balancer les charges créées par la réaction. Cependant les études de Vivian (1951) démontrent qu'il ne faut pas sous-estimer le rôle des alcalis car ceux-ci ont un rôle important à jouer au point de vue de la vitesse de réaction et des propriétés physiques des produits de réaction.

La présence du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est importante car une forte concentration se traduit en un pH élevé de la solution instertielle du béton, ce qui est significatif pour la

dissolution de la silice.

Le Ca(OH)_2 régénère ainsi les alcalis, lorsque le Ca vient se substituer au Na ou au K.

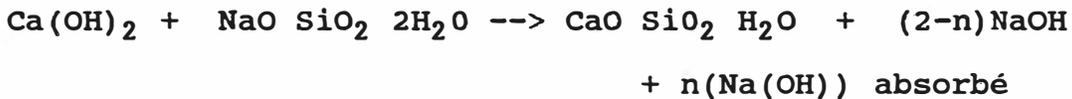
Les études de Dent-Glasser et Kataoka (1982b) ont démontré que le Ca^{2+} est absorbé rapidement par un gel siliceux. Cependant, le calcium ne passerait pas directement de la portlandite au gel mais serait d'abord dissout dans la solution interstitielle.

Ainsi le résultat est double; le Ca(OH)_2 crée un pH élevé et régénère les alcalis. En sa présence la réaction est toujours régénérée. Il faut noter que le Ca(OH)_2 est produit lors de l'hydratation du ciment, et qu'un ciment complètement hydraté contiendra jusqu'à 25 % de ce composé, ce qui veut dire que sa présence est inévitable dans un béton normal.

Cependant Chatterji (1979), Ming-Shu et Su-Fen (1980) et Ming-Shu et al. (1983) signalent une autre possibilité quant au rôle du Ca(OH)_2 dans le mécanisme de réaction. Selon eux le Ca(OH)_2 réagirait avec le gel de tobermorite, produit de l'hydratation du ciment portland, pour produire un gel plus riche en calcium. Ceci a comme

conséquence que plus d'alcalis sont libérés par ce composé. Ces alcalis remis en circulation peuvent ainsi provoquer une réaction plus intense.

En tenant compte du Ca(OH)_2 , la réaction peut maintenant s'écrire comme suit:



Lors de ses travaux de doctorat, Durand (1988), qui étudia alors le rôle des additifs minéraux dans le contrôle des réactions alcalis-granulats, détermina que de tous les paramètres étudiés la meilleure relation avec la réduction des expansions était obtenue avec le pourcentage de réduction de la teneur en Ca(OH)_2 .

Précisons que Durand abaissait la teneur en Ca(OH)_2 de ses bétons en ajoutant un certain pourcentage de fumée de silice condensée. Cet additif minéral se combine avec la portlandite pour former plus de gel de CSH. Il y avait donc moins d'alcalis disponibles pour la réaction alcalis-granulat.

II.3: Produits de réaction

Les produits résultant de la réaction entre la silice faiblement cristallisée et le liquide interstitiel est un gel calco-alcalin-siliceux. Ce gel absorbe l'eau disponible et devient donc plus fluide, il peut alors se déplacer et remplir les pores et les micro-fissures présents dans les granulats et la pâte de ciment.

La figure 5 illustre une vacuole d'une pâte de ciment remplie de ce gel.

La figure 6 montre une veinule dans un fragment de calcaire rempli aussi de ce gel, tandis que la figure 7 montre une couronne de réaction autour d'un fragment d'orthoquartzite.

Durand et Bérard (1987) ont démontré que le gel produit lors d'une réaction entre la silice faiblement cristallisée dans un calcaire et les alcalis, avait une composition pratiquement constante lorsque le gel est retrouvé sous forme de veinule dans des granulats calcaires. La composition est la suivante: SiO_2 51%, CaO 12%, K_2O 8% , Na_2O 6%, FeO 2%, le reste, soit 21%, était de l'eau. Cette composition chimique peut donc servir de



fig. 5-Vacuole d'une pâte de ciment remplie de gel calco-alkalin-siliceux.

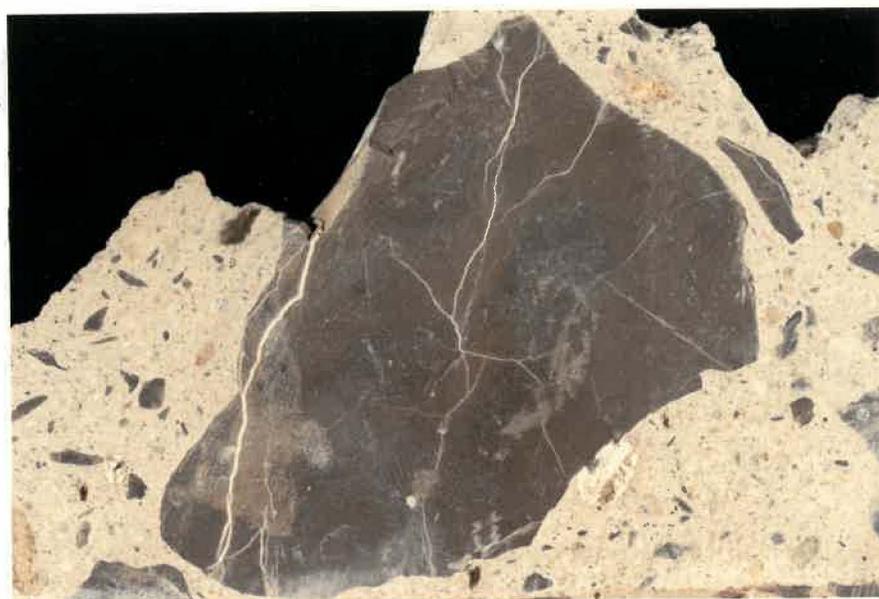


Fig. 6-Veinules dans un granulat calcaire remplies de gel calco-alkalin-siliceux.

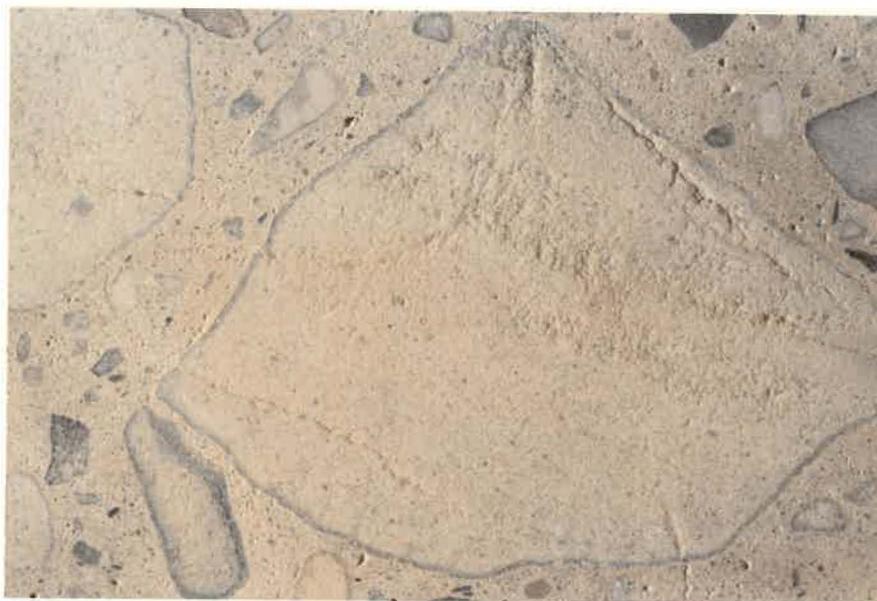


fig. 7-Couronne de réaction autour d'un fragment d'orthoquartzite.

National Library
of Canada

Canadian Theses Service

Bibliothèque nationale
du Canada

Service des thèses canadiennes

NOTICE

QUALITY OF THIS MICROFICHE
HEAVILY DEPENDENT UPON THE
QUALITY OF THE THESIS SUBMITTED
FOR FILMING.

UNFORTUNATELY THE COLOURED
ILLUSTRATIONS OF THIS THESIS
MAY YIELD DIFFERENT TONES

AVIS

LA QUALITE DE CETTE MICROFICHE
DEPEND GRANDEMENT DE LA QUALITE DE LA
THESE SOUMISE AU MICROFILMAGE.

MALHEUREUSEMENT, LES DIFFERENTES
ILLUSTRATIONS EN COULEURS DE CETTE
THESE NE PEUVENT DONNER QUE DES
TEINTES DE GRIS.

critère d'identification de la présence d'une réaction.

Ces auteurs ont aussi mis en évidence que la composition du gel retrouvé dans les pores de la pâte de ciment possédait une composition beaucoup plus variable. Ceci est dû au fait que les ions de la pâte de ciment ont une plus grande facilité à atteindre ces pores que l'intérieur des granulats.

Concrètement, la réaction alcalis-granat se traduit par une fissuration caractéristique polygonale des structures. Cette fissuration est accompagnée d'exsudations blanchâtres de gel et de surfaces d'éclatement.

Il est important de souligner que la fissuration créée par une réaction de ce genre rend la structure inévitablement plus sensible aux méfaits du gel-dégel et à la pénétration des solutions potentiellement agressives.

II.4: Intensité de la réaction

L'intensité d'une réaction alcalis-silice dépend de plusieurs facteurs, soit:

- a. présence de particules réactives.
- b. pourcentage d'alcalis solubles disponibles.
- c. présence de Ca(OH)_2 .
- d. présence d'humidité.
- e. résistance intrinsèque du béton.

a. particules réactives

Pour que l'on observe une réaction alcalis-granulat, le granulat doit posséder un certain pourcentage de particules réactives. Il faut aussi considérer la taille de ces particules, car plus la taille est petite plus les surfaces d'attaques seront importantes, rendant ainsi la réaction plus intense.

Il faut aussi considérer la plus grande finesse des ciments modernes ce qui facilite grandement la mise en solution des alcalis et du Ca(OH)_2 .

b. pourcentage d'alcalis solubles disponibles

Struble et Diamond (1985) ont démontré qu'il était important de considérer sous quelle forme les alcalis étaient présents dans un ciment et non pas seulement le pourcentage brut. Il faut se rappeler que les alcalis

peuvent se retrouver sous trois formes et que chacune possède des solubilités très différentes. Pour un même pourcentage brut, le ciment dont les alcalis sont sous forme de sulfates donnera beaucoup plus d'expansion que si ceux-ci se retrouvaient au sein des silicates de calcium.

Les travaux de Dobie (1986), ont démontré que plusieurs ciments américains possédaient des pourcentages d'alcalis solubles variant entre 10 et 60% des alcalis totaux. Le choix du ciment peut donc influencer l'intensité de la réaction.

Il faut aussi tenir compte du dosage du mélange (Nixon et Page, 1987). En effet un dosage élevé en ciment se traduit en une plus grande concentration en alcalis dans le liquide interstitiel, et cette solution peut être plus agressive et causer une réaction plus intense.

c. présence de Ca(OH)_2

La présence de portlandite est indispensable pour qu'il y ait une réaction. Ce composé augmente le pH, ce qui permet la mise en solution de la silice. De plus, en se substituant aux alcalis du gel calco-alcalin-siliceux, il régénère ceux-ci et la réaction peut donc se continuer.

d. humidité

On peut utiliser un granulats réactif dans les cas où les bétons ne seront pas exposés à des conditions humides. Il faut de l'eau pour que la réaction s'effectue, bien que dans certains cas de roches très réactives, une amorce de réaction peut apparaître grâce à l'eau libre qui est encore disponible (Bérard, comm. pers.).

e. résistance intrinsèque du béton

La présence de gel n'entraîne pas nécessairement la fissuration du béton. Il faut tenir compte par exemple de la porosité du béton car plus un béton est poreux plus il pourra accommoder de gel et ralentir le processus de fissuration. Les travaux de Lenzner (1981) démontrent qu'un béton possédant un rapport eau/ciment plus élevé minimise les expansions obtenues avec un granulats réactif.

Le fait qu'un rapport eau-ciment élevé apporte des concentrations plus faibles en alcalis et en Ca(OH)_2 dans le liquide interstitiel rend donc celui-ci moins agressif.

Jensen et al., (1984) ont démontré que l'introduction de 4% d'air entraîné dans un béton diminuait les

expansions attribuables à une réaction alcalis-silice de l'ordre de 40%.

II.5: Types de granulats réactifs

Il est maintenant reconnu que les granulats réactifs se retrouvent partout dans le monde. Le tableau 2 classifie les types de réactions alcalis granulat, les constituants réactifs et les roches correspondantes.

Dans ce tableau, on retrouve trois types de réactions alcalis-granulats. Le premier type regroupe les minéraux siliceux et verres volcaniques réactifs aux alcalis. Les formes réactives sont ici, par exemple, le chert et l'opale (voir figure 8). Le deuxième type de réaction implique plutôt les roches quartzifères, où la composante réactive est plutôt le quartz avec une structure déformée. On reconnaît ce quartz par son extinction ondulante au microscope polarisant (voir figure 9). Dolar-Mantuani (1983) et Buck (1987) ont proposé des méthodes d'évaluation du degré de réactivité de ce genre de quartz.

Ces deux types de réactions se distinguent surtout par

A- MINERAUX ET ROCHES SILICEUSES REACTIVES AUX ALCALISA₁ - MINERAUX SILICEUX ET VERRES VOLCANIQUES REACTIFS AUX ALCALIS

COMPOSANTE REACTIVE	: Opale, tridymite, verres volcaniques acides intermédiaires et basique:
ROCHES CORRESPONDANTES	: Roches contenant de l'opale tels des schistes argileux, roches carbonatées, chert: roches volcaniques vitophyriques, acides, intermédiaires et basiques, tels des rhyoloites dacites et andésites et leurs équivalents sous formes de tuffs: toutes les variétés de roches volcaniques avec une matrice vitreuse: basalte.
EXPANSION	: Principalement due à des pressions hydrauliques provoquées par imbibition d'eau par le gel calco-alcalin-siliceux.

A₂ - ROCHES QUARTZIFERES REACTIVES AUX ALCALIS

- A) ROCHES SILICEUSES
B) ROCHES SILICATEES

COMPOSANTE REACTIVE	: Calcédoine, quartz cryptocristallin à macrocristallin et macrogrenu avec une structure cristalline déformée ou riche en inclusions secondaires: microquartz (taille de 0.01 mm à 0.05 mm, i.e., quartz microcristallin fin à grenu).
ROCHES CORRESPONDANTES	<p>A : Roches avec des teneurs normales en silice aux environs de 95%, tel du chert sans opale mais avec de la calcédoine et/ou du microquartz (meso à macrocristallin): veine de quartz, quartzite, arénite quartzique.</p> <p>B : Roches volcaniques comme en A₁ avec une matrice dévitrifiées, cryptocristallines à microcristallines; métavolcaniques; roches micro à macrogrenues; argilites, silstones, grauwackes, arénites arkoses, ardoises, phyllades, schistes à quartz et micas, granite et gneiss, granodiorites, charnockites.</p>

B- ROCHES CARBONATEES REACTIVES AUX ALCALIS

COMPOSANTE REACTIVE	: Dolomite (métastable, processus de dédolomitisation).
ROCHES CORRESPONDANTES	: Calcaires dolomitiques argileux, dolomies calcaires argileuses; roches argileuses contenant du quartz; dolomies calcaires.
EXPANSION	: Due à l'imbibition d'eau par des minéraux argileux secs et autres constituants mineurs, ou autres causes physico-chimiques.

Tableau 2: Types de réactions alcalis-granulat.
(D'après Dolar-Mantuani, 1983).

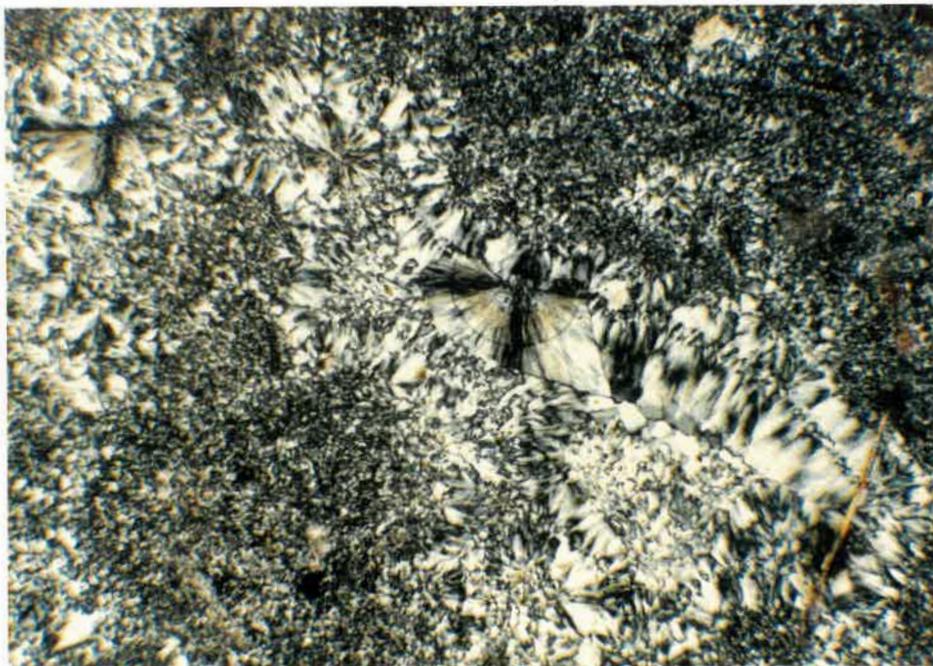


Fig. 8-Présence de chert et d'opale dans un calcaire.

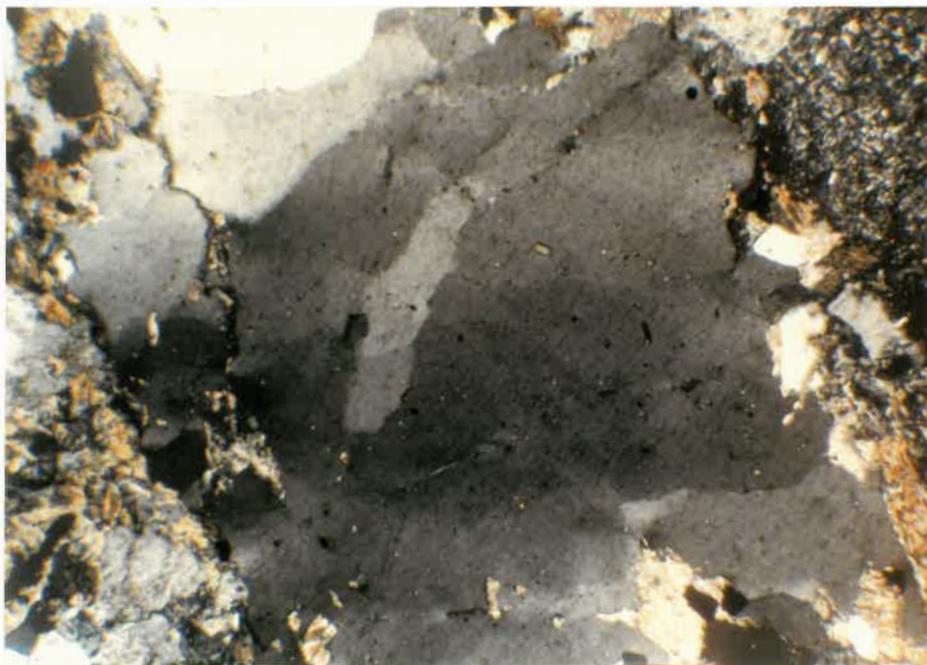


Fig. 9-Quartz à extinction ondulante examiné au microscope polarisant.

la vitesse de réaction. Le premier type de réaction se manifeste habituellement rapidement. Un granulat très réactif peut exhiber des traces de réaction après seulement cinq ans. Le deuxième type réagit beaucoup plus lentement, d'où le nom "expansion tardive" .

Enfin, le troisième type de réaction implique les roches carbonatées dolomitiques ayant un processus de réaction complètement différent. Au Canada, ce genre de réaction a été surtout identifié en Ontario dans la région de Kingston. Le mécanisme de réaction impliqué ici a été décrit par plusieurs auteurs dont Dolan-Mantuani, (1964,1972,1985), Gillott et Swenson, (1969) et Rogers, (1985).

Au Québec, les dolomies du Groupe de Beekmantown n'ont pas jusqu'à maintenant exhibé ce genre de réaction.

CHAPITRE III

REVUE DES ESSAIS

III.1: Les essais normalisés

III.1.1: L'examen pétrographique

L'examen pétrographique effectué selon la norme A23.2-15A devrait toujours précéder l'utilisation d'un granulats à béton. Dolar-Mantuani, (1978) décrit bien les aspects pratiques qui entourent l'exécution de cet examen tandis que l'annexe B de la norme A23.1-M77 insiste sur les espèces minérales à identifier.

Cet essai rapide est peu coûteux et peut donner de nombreuses informations lorsqu'il est effectué par un géologue-pétrographe possédant une expertise des problèmes de réactivité avec les alcalis.

L'examen de lames minces au microscope polarisant permet au géologue d'identifier la présence de phases potentiellement réactives et dans plusieurs cas, en se

basant sur son expérience, il pourra accepter ou refuser le granulats proposé.

Si la pétrographie optique laisse quelques doutes au pétrographe, celui-ci pourra alors utiliser des outils plus sophistiqués tels que la diffractométrie et le microscope électronique à balayage (Soles, 1979).

Il faut compléter cet essai, lorsque possible, par la visite de structures où ce granulats aurait déjà été utilisé. Ceci demeure le meilleur moyen d'évaluation pour un granulats alors qu'il est soumis aux conditions réelles de services. Cet examen est souvent compliqué par le fait qu'il est difficile de certifier que le granulats étudié est exactement le même que celui qui a été utilisé dans la structure examinée.

III.1.2: L'essai chimique (ASTM C-289)

Un des essais les plus populaires à l'heure actuelle est l'essai chimique rapide qui fût développé par Mielenz et al. (1947).

Cet essai est en effet attrayant car il ne demande que

peu de matériel, il est rapide, (on peut obtenir des résultats en moins de 3 jours) et relativement peu coûteux. Malheureusement, les résultats de l'essai sont souvent contradictoires et devraient donc être appréciés avec discernement.

L'essai consiste à broyer le granulat pour qu'il passe le tamis 50 (300 microns), et soit retenu sur le tamis 100 (150 microns). La poudre obtenue (25 grammes) est plongée dans une solution de NOH (1N), ceci dans un contenant scellé que l'on immerge dans un bain où l'eau est chauffée à 80°C . La durée de cette cure est de 24 heures.

On recueille par la suite le filtrat qu'on analyse pour en déterminer la quantité de silice dissoute (millimoles par litre) et la réduction en alcalinité (millimoles par litre) de la solution. Ces résultats sont reportés sur une abaque (voir figure 10) où on indique la réduction en alcalinité en ordonnée sur une échelle linéaire tandis que la silice dissoute est indiquée en abscisse sur une échelle logarithmique. L'abaque est subdivisée en trois zones; une première classe le granulat comme étant non-réactif, une deuxième considère le granulat comme étant réactif et une dernière zone classifie le granulat comme potentiellement réactif.

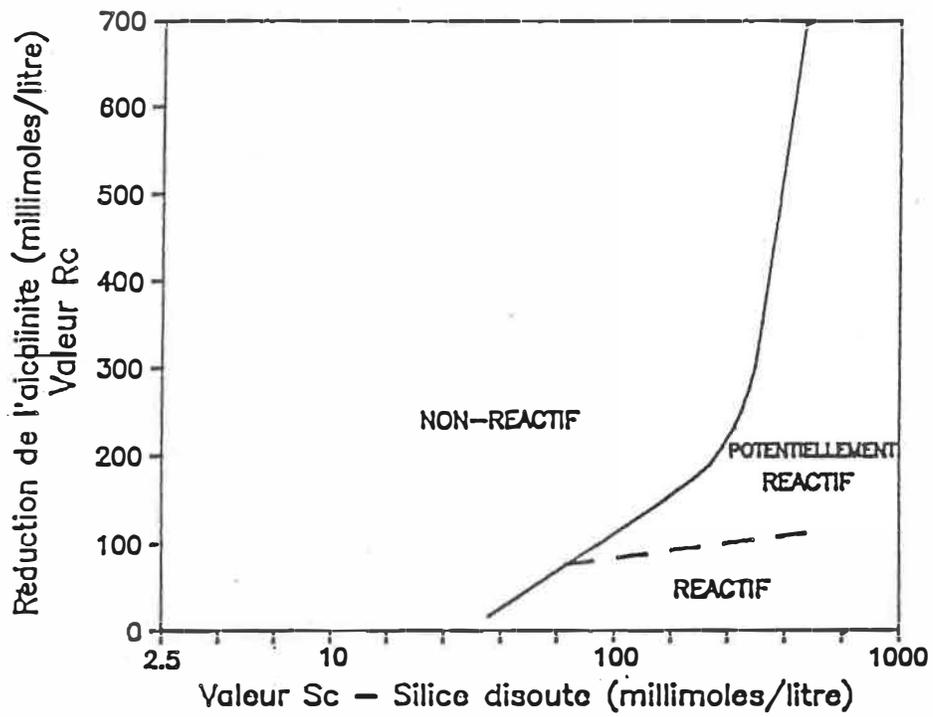


Fig. 10-Graphique où l'on rapporte les résultats de l'essai ASTM C-289.

L'essai ne doit pas être effectué sur des matériaux contenant des carbonates, du fer ou des silicates de magnésium car les résultats sont alors erronés.

Dent-Glasser et Kataoka (1981c) ont démontré que les résultats étaient grandement influencés par le choix de la phénolphthaléine comme indicateur et ceci pourrait expliquer, en partie, les résultats erronés.

Bérard et Roux (1986) proposèrent une modification intéressante à cette norme pour la rendre applicable aux roches carbonatées. L'essai se fait alors uniquement sur le résidu insoluble, recueilli après attaque au HCl. Les résultats sont uniquement utilisés comme base d'acceptation et non de refus. En effet si les résultats de l'essai effectué sur le résidu insoluble considèrent le granulats comme étant non-réactif, le granulats devrait être utilisé. Si par contre le résultat tombe dans une des deux autres zones de l'abaque, ceci indiquerait simplement que des essais supplémentaires sont nécessaires pour déterminer le potentiel de réactivité du granulats.

A notre avis, cette modification est fort valable mais gagnerait à considérer le pourcentage de résidu insoluble du granulats considéré. Présentement, qu'un granulats ait

un résidu insoluble de 5 ou 30%, l'essai sera effectué sur la même quantité de matériel. Un facteur de correction devrait être appliqué pour pondérer ces résultats.

III.1.3: L'essai avec barres de mortier (ASTM C-227)

L'essai le plus utilisé actuellement est celui de la barre de mortier. Cet essai consiste à réduire le granulat à la taille d'un sable, avec lequel on fabrique des barres de mortier de dimension 25mm X 25mm x 300mm (voir figure 11). La norme ne prévoit pas de rapport eau-ciment fixe mais permet plutôt un ajustement pour obtenir un certain étalement, i.e., entre 105 et 120 mm.

Après le démoulage et la prise de la mesure initiale, les barres sont entreposées à 38⁰C et 95% d'humidité relative. Cette humidité est maintenue grâce à de l'eau déposée dans le fond du récipient contenant les échantillons. Un tissu absorbant collé sur les parois du récipient assure que le niveau d'humidité demeure élevé et uniforme (voir figure 12). La cure est d'une durée de six mois et l'ASTM précise des pourcentages d'allongements maximums de 0.05% à 3 mois et de 0.1% à six mois.

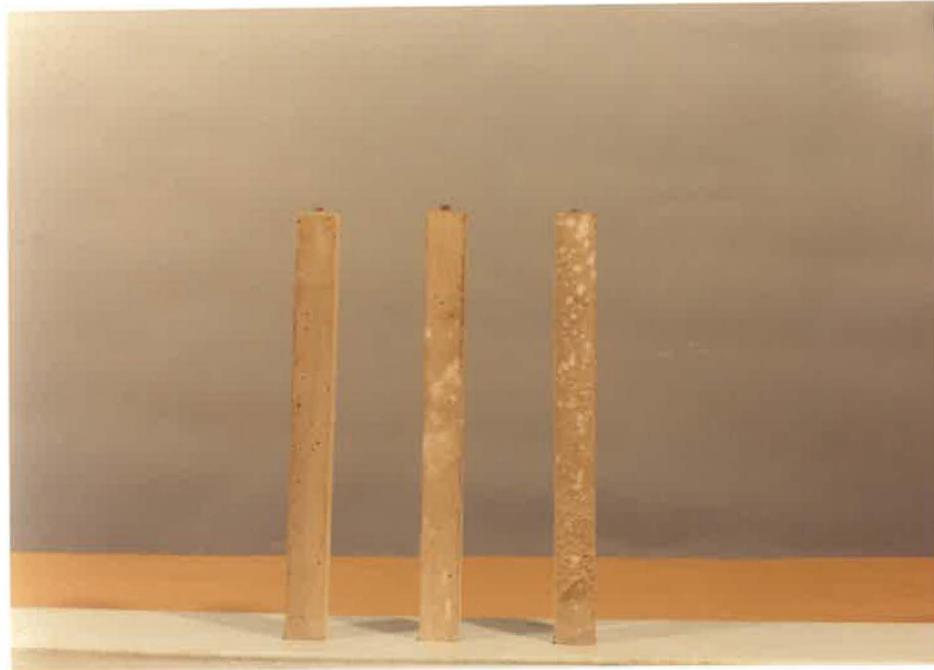


Fig. 11-Barres de mortier utilisées lors de l'essai ASTM C-227.



Fig. 12-Réceptacle utilisé pour l'essai ASTM C-227.

Cet essai ne mérite pas sa popularité actuelle car il ne détecte pas de nombreux granulats réactifs. Ainsi, certains organismes qui acceptent aveuglément les résultats de cette norme, continuent à utiliser des granulats réactifs.

Bérard et Roux (1986) ont démontré que l'essai ne détectait pas la réactivité des roches granitoides à réactions périphériques, et n'était pas fiable pour les calcaires réactifs avec formation de veinules. L'essai semble adéquat uniquement pour les granulats très réactifs à court terme.

Hooton (1986) a démontré que les résultats de l'essai sont grandement influencés par le type de contenant utilisés. Selon le type de contenant utilisé il obtient, pour un même granulat, des valeurs d'expansion variant entre 0.366 et 0.588%, ceci pour un coefficient de variation de 17.4%. D'après Hooton, ces différences sont attribuables, en grande partie, à la variation du degré d'humidité dans le contenant. En analysant le contenu en alcalis de l'eau au fond des contenants, il observa que les plus grands pourcentages d'allongements étaient reliés à une plus grande concentration d'alcalis dans l'eau. Ceci confirmerait l'idée voulant qu'un fort pourcentage

d'humidité est nécessaire pour qu'il y ait une réaction importante et que les alcalis lessivés lors de l'essai ne représentent qu'une infime partie des alcalis présents dans le ciment.

L'étude de Struble et Diamond (1985) démontre que les résultats de l'essai sont aussi grandement influencés par le pourcentage d'alcalis solubles présents dans le ciment. En se servant de 4 ciments dont le pourcentage d'alcalis solubles variait beaucoup et de 3 granulats dont deux réactifs et un non-réactif, ils ont démontré que les allongements obtenus étaient directement proportionnels au pourcentage d'alcalis solubles, ceci pour chacun des granulats.

Grattan-Bellew (1981a) détermina que la limite d'expansion permise de 0.1% à six mois était inadéquate. En se basant sur le fait que chaque granulat possède un rythme d'expansion qui lui est propre, il propose plutôt que différentes limites d'expansions soient déterminées en tenant compte du type de granulat considéré.

III.1.4: ASTM C-586: Expansion de mini-prismes de roche

Cet essai consiste à placer des mini-prismes ou mini-cylindres de roche dans une solution de NaOH 1N à la température de la pièce. (voir figure 13). L'ASTM spécifie un pourcentage d'allongement maximum de 0.1% mais aucune limite de temps n'est spécifiée pour atteindre cette valeur.

La figure 14 montre le type d'appareil utilisé pour mesurer les expansions des mini-prismes de roche.

Cet essai est peu coûteux, ne requiert que peu de matériel et s'est avéré approprié pour détecter les roches réactives de types alcalis-carbonates. Newlon et Sherwood (1964), ont démontré que pour ce type de roche, on obtenait une corrélation de 0.9857 entre les expansions obtenues avec cet essai et celles obtenues avec les prismes de béton (ACNOR).

Par contre, les roches réactives de type alcalis-silice donnent des résultats mitigés lorsque soumis à cet essai.

L'essai présente certains désavantages, entre autres,



Fig. 13-Mini-prismes de dolomie, selon la norme ASTM C-586.

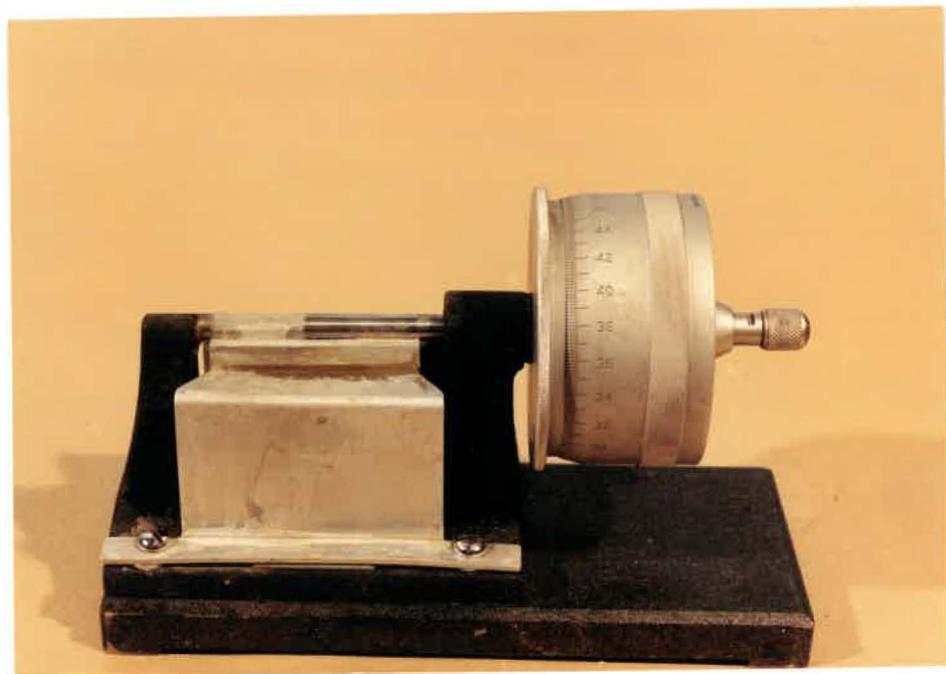


Fig. 14-Appareil de mesure des mini-prismes.

que le pourcentage d'expansion est dépendant de l'orientation de l'échantillon par rapport au litage de la roche. De plus l'essai est très peu représentatif des conditions réelles qui règnent dans un vrai béton.

III.1.5: ACNOR A23.2-14A; Expansion de prismes de béton

L'essai avec prismes de béton est le plus réaliste car il représente toutes les conditions d'un vrai béton. L'essai consiste à suivre l'expansion de prismes (75 x 75 x 300 mm à 120 x 120 x 450 mm) (voir figure 15) entreposés à 38° et à 95 % d'humidité relative sur une période d'un an. (voir figure 16). L'ACNOR précise les maximums d'expansions: 0.04% à un an pour la classe d'exposition humide et de 0.075% pour la classe d'exposition sèche.

Les prismes sont confectionnés avec le matériel tamisé de calibre 20, 14, 10 et 5 mm. La norme prévoit un dosage en ciment de 310 kg par mètre cube de béton et les alcalis sont augmentés artificiellement à 1.25%. Le sable utilisé doit être non-réactif et posséder un module de finesse de 2.7. Le granulat grossier doit constituer entre 50 et 65% du granulat total (granulat grossier plus sable).



Fig. 15-Prismes de béton selon la norme ACNOR A23.2-14A.



Fig. 16-Réceptacle utilisé pour la cure de la norme ACNOR A23.2-14A.

Cet essai permet de détecter à peu près tous les types de réactivités alcalis-granulats à moins qu'ils ne soient très lents comme dans le cas des roches granitoides. (Bérard et Roux, 1986)

Le désavantage majeur de cet essai est sa durée qui est d'un an. Il y a aussi la quantité considérable de matériel nécessaire à la confection des prismes qui peut devenir un aspect négatif de l'essai.

La norme pourrait être améliorée si l'ACNOR proposait un mélange type que tous les laboratoires adopteraient. Présentement la norme n'est pas très spécifique sur le dosage du mélange, ce qui peut expliquer, en partie, les écarts obtenus d'un laboratoire à un autre. On aurait aussi avantage à fixer le rapport eau-ciment, car présentement, c'est avec l'affaissement que l'on fixe ce rapport ce qui est, d'après nous, incorrect.

111.2: Nouvelles méthodes d'essais

111.2.1: Essai chimique de changement de volume

Un essai proposé par Knudsen (1987) consiste à placer un granulat sous forme de sable (0.3-0.4 mm) dans une solution de NaOH 10 molaire, à 50⁰C pendant une période de 20 heures. Le retrait chimique qu'engendre la dissolution de la silice par la soude est enregistré automatiquement et de façon continue. Knudsen fixe un retrait de 0.4 ml par kg de sable comme étant le maximum permis. Le retrait serait ici directement proportionnel à la silice dissoute et peut donc servir de valeur pour discriminer les granulats réactifs.

L'avantage de cet essai, d'après Knudsen, est qu'en plus d'être rapide, il élimine toutes les autres variables que l'on peut retrouver dans les essais avec pâtes de ciment, i.e., porosité, température, accessibilité de l'eau, etc. Ainsi, on est certain de ne mesurer que la réactivité de la silice face à la soude. Cependant, il faut admettre que l'on s'éloigne passablement des conditions réelles d'un béton.

Knudsen a obtenu de bonnes corrélations entre ses résultats et ceux obtenus avec la méthode accélérée sur barres de mortier de Chatterji (1978).

III.2.2: Essai Duggan

Scott et Duggan (1987) proposent un essai accéléré sur des carottes tirées de structures existantes ou fabriquées en laboratoire. Celles-ci ont un diamètre de 22 mm et une longueur de 50 mm et sont soumises à ce que l'on nomme le cycle Duggan. Ce cycle consiste en une alternance de cure dans de l'eau distillée à 21⁰C et dans une chambre à air sec à 82⁰C. Ce cycle est représenté à la figure 17.

A la fin de ces manipulations préparatoires d'une durée totale de 10 jours, on prend la mesure initiale et on retourne les carottes à la cure dans l'eau à 21⁰C. Des mesures subséquentes sont prises à tous les 3 ou 5 jours.

Lorsque Scott et Duggan soumièrent des carottes tirées de vieilles structures à cet essai, ils obtinrent de bonnes corrélations entre les allongements et le degré de réactivité observé. Un béton de 12 ans montrant tous les signes d'une réaction avancée donne des expansions de 0.3% après 20 jours de cure à l'opposé d'un béton sain d'une quinzaine d'année qui ne donne que 0.08% d'allongement.

Des carottes tirées de cubes fabriqués en laboratoire soumis à l'essai, donnent des allongements proportionnels

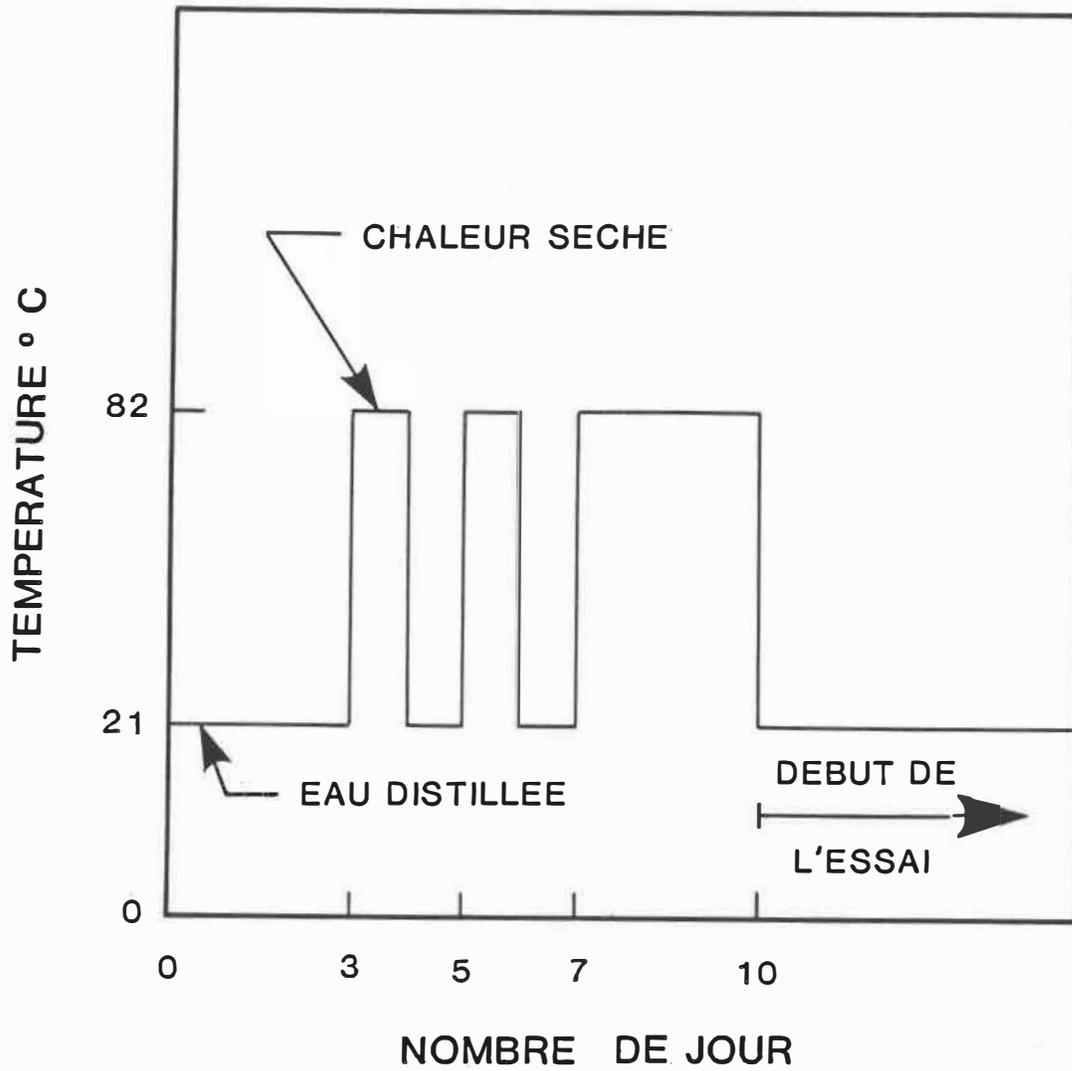


Fig. 17-Cycle de l'essai Duggan. (D'après Scott et Duggan, 1980).

au degré de réactivité des granulats ainsi qu'au pourcentage d'alcalis présents dans les ciments.

Pour l'instant, le manque de données disponibles sur cet essai nous empêche de formuler une opinion sur sa validité. Il faut quand même souligner que des allongements de 1.0% ont été obtenus après une cure de seulement 30 jours, ceci avec des granulats reconnus pour leur réactivité. Cet ordre de grandeur dans les allongements nous paraît disproportionné par rapport aux allongements que peut engendrer une réaction alcalis-granat. Il semble donc que les allongements obtenus avec cette essai ne seraient pas uniquement dûs à la réaction alcalis-silice mais qu'un autre phénomène interviendrait pour les amplifier.

L'essai n'en est donc qu'à un stade expérimental et ne peut être suggéré pour le moment tant que d'autres travaux ne démontreront pas tous les phénomènes impliqués dans les allongements obtenus. Cet essai est présentement sous étude par le comité C-9 de l'ASTM.

III.2.3: Essais à l'autoclave

Les essais en autoclave ont été développés en Chine et au Japon où ils sont très populaires. Nous présentons ci-dessous trois essais qui ont été proposés dernièrement.

A. L'essai chimique (Tang et al., 1987)

Cet essai utilise des barres de mortier de 10 x 10 x 80 mm. On procède à une cure à 100% d'humidité durant 24 heures suivie d'une cure à la vapeur d'une durée de 4 heures et finalement un traitement en autoclave à une température de 150⁰C durant 6 heures. Durant ce traitement, les échantillons baignent dans une solution de KOH 10%. Les auteurs proposent un maximum d'expansion de 0.11-0.12% et ils ont obtenus de bonnes corrélations entre leurs résultats et ceux des normes ASTM C-227 et C-289.

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

On utilise ici des barres de mortier de 40 x 40 x 160 mm. Après le démoulage qui se fait 24 heures après la mise en place, les auteurs ont tenté différentes cures. Les barres pouvaient subir des cures de 1, 3 ou 6 jours dans

l'eau avant de subir la cure en autoclave. Cette dernière était variable au niveau de la durée, de la pression et de la température.

Leurs travaux mentionnent comme conditions optimales un pourcentage de Na_2O équivalent de 1.5%, un séjour dans l'autoclave de 4 à 5 heures à une pression de 1.5 Kg/cm^2 et finalement aucun séjour dans l'eau après le démoulage.

Lorsque les auteurs comparent leurs résultats, ils obtiennent approximativement, pour un même granulats, les mêmes expansions qu'après 20 semaines de cure pour l'essai ASTM C-227.

C. La méthode GBRC (Tamura et al., 1987)

Des barres de mortier de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ sont confectionnées et la teneur en alcalis est augmentée artificiellement à 2.5%. Après la période de durcissement de 24 heures, on plonge les barres dans de l'eau à la température de la pièce pendant 24 heures. Par la suite les barres subissent une cure à l'autoclave pour une période de 2 heures à une pression de 1.5 kg/cm^2 et une température de 111°C . Les auteurs ont testé plus de 112 granulats japonais et, selon eux, leur degré de réactivité

a été bien estimé par l'essai.

III.2.4: Essai accéléré par durcissement dans une solution de NaOH à 80 C. (Yoshika et al., 1987)

L'essai proposé est inspiré de celui d'Oberholster et Davies (1986). Les barres de 40 x 40 x 160 mm sont aussitôt après leurs démoulages immergées dans l'eau à 20⁰C pour une durée de 24 heures. Suivent une période d'immersion de 24 heures dans une solution de soude à 80⁰C et une période de 24 heures dans l'eau à 80⁰C. Finalement, les barres passent 72 heures dans la solution de soude toujours à 80⁰C suivie d'une période de 24 heures dans l'eau à 20⁰. On prend alors la mesure finale. Les auteurs obtiennent de bonnes corrélations à 7 jours entre leurs résultats et ceux de la norme ASTM C-227.

III.2.5: Barres immergées dans une solution de NaCl

L'essai proposé par Chaterji en 1978 utilise des barres de 40 x 40 x 160 mm avec un dosage ciment-sable-eau de 1:2:0.5. Ces barres sont immergées dans une solution saturée en NaCl et maintenue à 50⁰C. L'auteur ne précise

pas de maximum d'expansion permis ni de limite de temps, mais il semble satisfait des résultats obtenus.

III.2.6: Essai accéléré de Oberholster et Davies

Cet essai maintenant connu comme étant l'essai sud-africain a été proposé par Oberhloster et Davies (1986). L'essai utilise des barres confectionnées selon la norme ASTM C-227, qui après démoulage sont immergées dans une solution d'eau distillée que l'on place dans une étuve qui élève la température de la solution à 80⁰C. Après 24 heures, une mesure initiale est prise et les barres sont par la suite transférées dans une solution de NaOH 1N à 80⁰C. La cure a une durée de 14 jours et les auteurs proposent une limite d'expansion de 0.11% à 12 jours.

Cet essai connaît une popularité grandissante à travers le monde et on commence à accumuler beaucoup de données, ce qui est un point important. L'essai est simple et, pourvu qu'on prenne les précautions d'usages lors de l'exécution, il semble valable.

C'est cet essai qui a surtout fait l'objet de nos recherches et nous en reparlerons davantage dans ce qui va

suivre.

III.3: Evaluation des nouveaux essais

A notre avis les méthodes purement chimiques ne sont pas valables car celles-ci sont trop éloignées des conditions réelles présentes au sein d'un vrai béton.

Les méthodes de cure à l'autoclave sont rapides et s'appliquent à des échantillons de mortier. Celles-ci sont donc réalistes à ce niveau mais les pressions utilisées (1.5 Kg/cm^2) et les températures de l'ordre de 100°C et plus sont des conditions qui s'éloignent passablement de la réalité.

Notre intérêt porte donc davantage sur les méthodes d'expansions accélérées telles que proposées par Oberholster et Davies. Les échantillons représentent des conditions réalistes puisqu'il s'agit de barres de mortier. Les conditions d'entreposage (soit 80°C en solution de NaOH 1N), quoique plus sévères que les conditions réelles demeurent tout de même un compromis acceptable.

Cette modification de la norme originale ASTM C-227 (expansion de barres de mortier à 38⁰C et 95% d'humidité relative) représente donc un compromis acceptable d'autant plus qu'elle permet de réduire de six mois à quatorze jours, le temps requis pour obtenir des résultats. De plus ce nouvel essai permet d'éliminer les problèmes de contenants et de conditions d'humidité rencontrés avec l'essai conventionnel.

Nous croyons cependant qu'il est aussi important de soumettre des prismes de béton, conformes à la norme A23.2-14A de l'ACNOR, à ces nouvelles conditions de cure. Il est inutile d'insister ici sur l'importance de la structure de certains granulats sur leur degré de réactivité. Ceci est en fait le grand désavantage des barres de mortier alors que le granulat perd, en grande partie, sa structure originale.

CHAPITRE IV

LES GRANULATS

IV.1: Choix des granulats

Il y a présentement au Québec plus de 149 carrières en opération*. De ce nombre 68 exploitent de la pierre calcaire, i.e., près de 50%. Notre échantillonnage a donc tenu compte de ce facteur et nous avons apporté une attention particulière à ce type de granulats.

Plus de 17 granulats ont été sélectionnés pour cette étude dont 9 calcaires, une dolomie, un grès, un gneiss, une métavolcanique, un schiste chloriteux, une syénite, un tuff rhyolitique et un basalte. La figure 18 présente nos sites d'échantillonnage tandis que le tableau 3 spécifie le type de roches pour chacun de ces sites.

*Source: Ministère Energie et Ressources, Québec, Service de la Statistique.

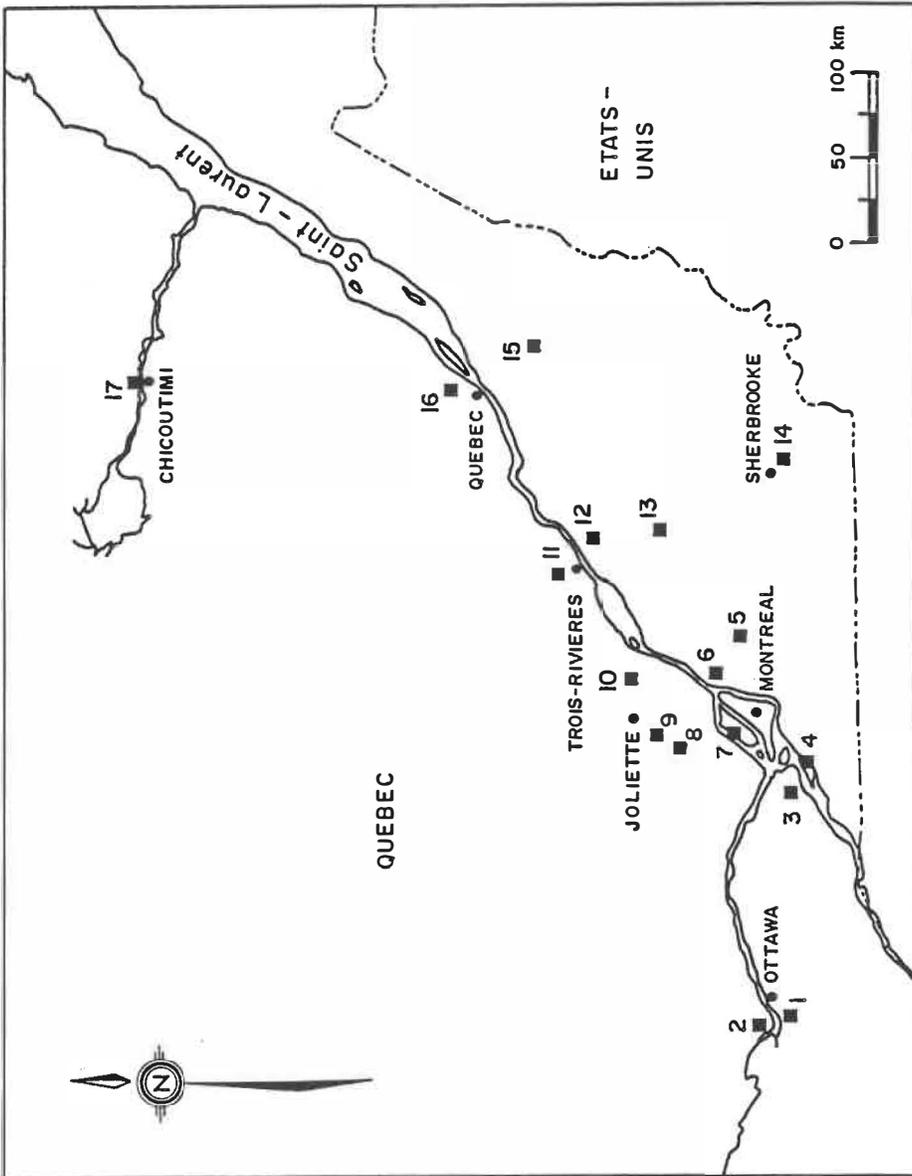


Fig. 18-Sites d'échantillonnage.

SITES	LIEU	FACIES PETROGRAPHIQUE	REACTIVITE*
1	Ottawa	calcaire	1
2	Hull	calcaire	2
3	Côteau-du-Lac	dolomie	2
4	Beauharnois	orthoquartzite	1
5	St-Jean	calcaire	1
6	Varenes	syénite	3
7	Laval	calcaire dolomitique	3
8	St-Hypolite	gneiss oeilé	2
9	St-Jacques	calcaire	1
10	Berthier	calcaire	1
11	Trois-Rivières	calcaire	1
12	St-Wenceslas	métavolcanique	2
13	St-Cyrille	basalte	3
14	Sherbrooke	schiste à chlorite	1
15	St-Georges	tuf rhyolitique	1
16	Charlesbourg	mudstone calcareux	1
17	Chicoutimi	calcaire	2

*REACTIVITE: 1 granulat réactif
 2 granulat contenant des phases
 potentiellement réactives
 3 granulat non-réactif

TABLEAU 3: Sites d'échantillonnage.

Le comportement de ces roches comme granulats à béton est bien connu. Nous avons tenté en fait d'obtenir trois catégories de granulats. Un premier groupe est composé de pierres très stables chimiquement et qui ne montrent aucune trace de réactivité lorsqu'utilisées comme granulats à béton. On y retrouve, par exemple, un basalte et une syénite. Un deuxième groupe réunit les granulats reconnus comme étant très réactifs, soit un calcaire d'Ottawa, un calcaire de Trois-Rivières et un orthoquartzite de Beauharnois. Un dernier groupe est constitué de granulats potentiellement réactifs ou faiblement réactifs: on y retrouve des calcaires et un gneiss.

IV.2: Technique d'échantillonnage

Deux techniques différentes ont été retenues lors de nos échantillonnages. La plus utilisée fût la technique d'échantillonnage ponctuel, le choix se faisant selon le type de faciès pétrographique recherché: ces granulats furent choisis en fonction d'un degré de réactivité connu. Les blocs recueillis dans les carrières ont été concassés dans nos laboratoires.

Dans le cas où les carrières visitées présentaient un seul faciès pétrographique, schiste chloriteux ou gneiss par exemple, nous avons choisi nos échantillons dans les piles de réserves selon les granulométries désirées.

IV.3: Etude pétrographique des granulats

Dans plusieurs cas, une étude pétrographique, effectuée par un géologue-pétrographe connaissant les problèmes de réactivité des granulats pourra donner une bonne idée du comportement éventuel du granulat dans le béton.

L'étude pétrographique qui suit nous indique la source, la composition minéralogique ainsi qu'un estimé du potentiel de réactivité aux alcalis, basé sur l'expérience acquise par histoires de cas.

A. Calcaire d'Ottawa

Ce calcaire provient de la formation Bobcaygeon datant de l'Ordovicien moyen. (Durand, B., comm. pers.). Cette

formation est approximativement l'équivalent du Leray, Ouareau, Mile-End et Deschambault de la région de Montréal.

Le calcaire est à grain fin et essentiellement constitué de calcite avec de petites quantités de dolomie. Le résidu insoluble (10%) est constitué de quartz, chert, calcédoine, illite et pyrite. Les phases réactives sont le chert et la calcédoine que l'on retrouve essentiellement dans les fossiles partiellement silicifiés. (voir figures 19 et 20)

Ce granulat, reconnu pour sa grande réactivité, a été très étudié à l'École Polytechnique de Montréal par Benoit Durand (1985, 1988). Les bétons fabriqués avec ce granulat présentent des signes de réactivité parfois avancés.

Dû à sa grande réactivité, le calcaire d'Ottawa sera un de nos granulats-repères.

B. Calcaire de Hull

Le calcaire de Hull à l'extrémité ouest de la province de Québec provient de la formation de Deschambault du

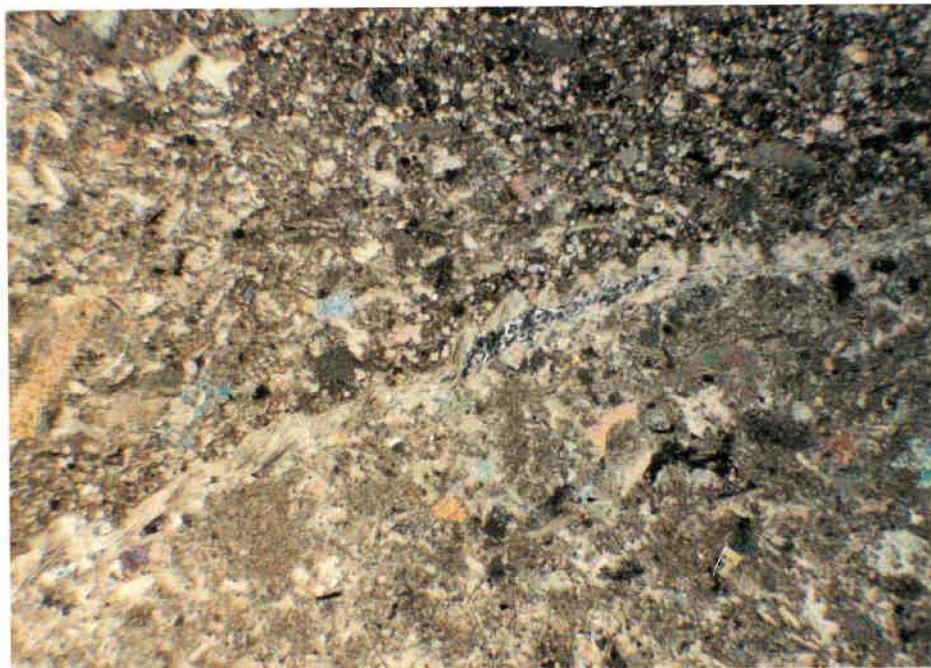


fig. 19-Photographie du calcaire d'Ottawa en lame mince. (lumière polarisée, 32X)

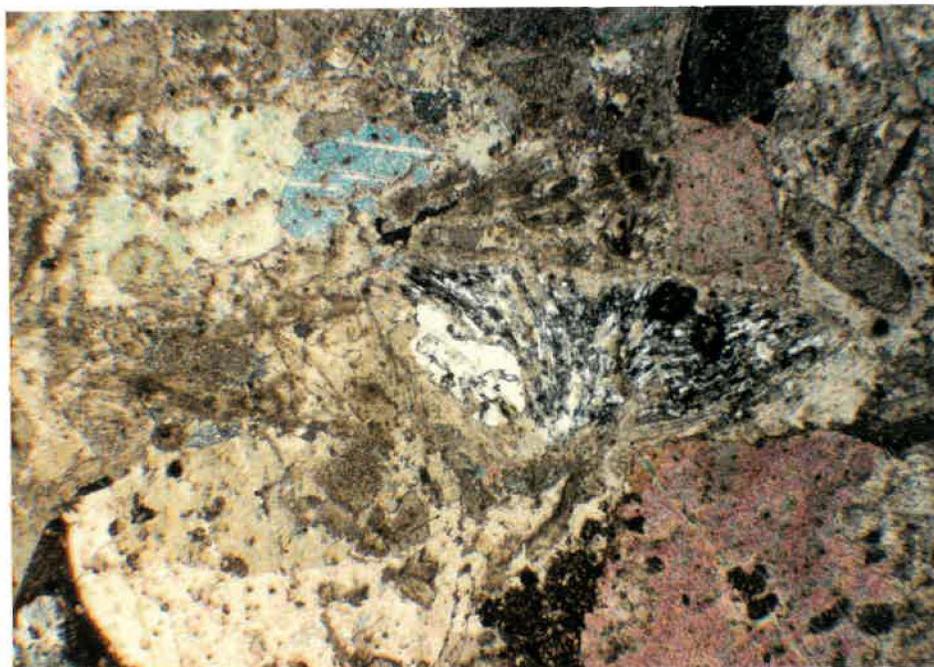


fig. 20-Photographie du calcaire d'Ottawa en lame mince. On observe la présence de chert. (lumière polarisée, 72X)

groupe de Trenton d'âge Ordovicien moyen (Dallaire, 1986).

Ce calcaire sombre à grain fin est toujours caractérisé par un fort pourcentage de micrite. On retrouve, ici et là, de la sparite, qui peut constituer jusqu'à 30% de l'ensemble. La monotonie est brisée par des passages de shale argileux riche en dolomie et en quartz. Du quartz est retrouvé dissimulé dans la micrite (voir figure 21).

Ce faciès possède un résidu insoluble de 16% et est considéré comme étant réactif aux alcalis. Sa réactivité est cependant faible.

C. Dolomie de Côteau-du-Lac

Cette dolomie provient de la formation de Beauharnois du groupe de Beekmantown d'âge Ordovicien (Globensky, 1982).

Cette dolomie est à grain fin et est très pure. La dolomie peut constituer jusqu'à 97% de l'ensemble du granulat. On observe aussi un faciès plus gréseux qui peut contenir jusqu'à 30% de petits grains de quartz et de

calcédoine. La calcédoine semble se concentrer dans certains horizons et peut constituer jusqu'à 5% de l'ensemble. (voir figure 22)

A notre connaissance, aucun problème de réactivité n'a jamais été relevé avec ce granulats.

D. Orthoquartzite de Beauharnois

Ce grès provient de la formation de Châteauguay du groupe de Potsdam d'âge Cambrien supérieur (Clark, 1972).

De couleur blanche le grès est composé de grains de quartz arrondis cimentés par de la silice en continuité optique avec ceux-ci (voir figure 23). Il prend une teinte légèrement beige lorsqu'altéré.

La réactivité de ce granulats a été reconnue pour la première fois par Bérard et Lapierre (1977) et aussi décrit par Albert et Raphael (1987). Plusieurs structures de la région de Beauharnois, notamment le barrage hydro-électrique de Beauharnois où ce granulats fût utilisé, démontrent des signes importants de réactivité. La cause de la réactivité est ici le ciment siliceux et

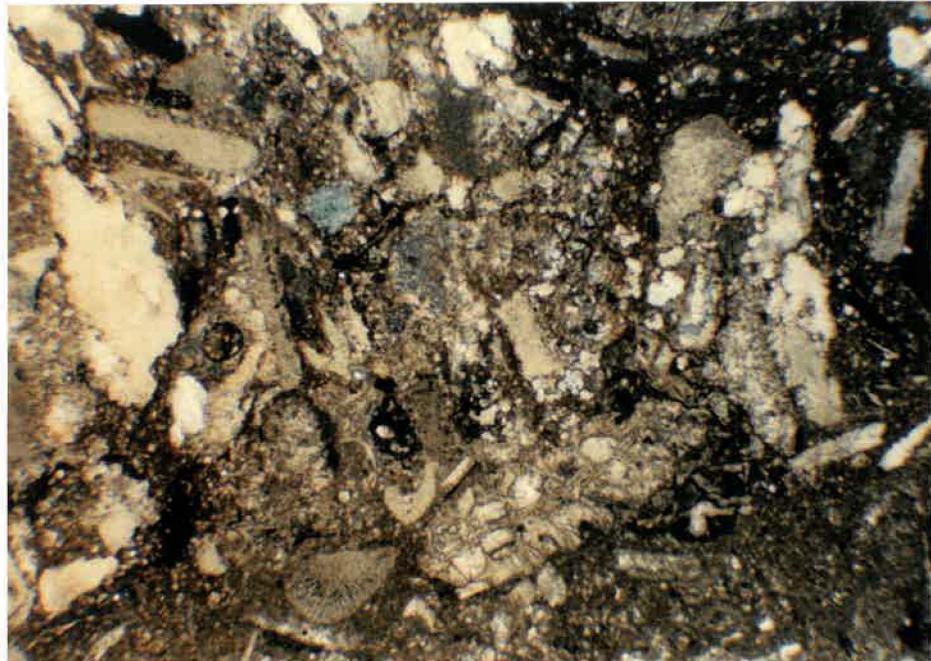


fig. 21-Photographie du calcaire de Hull en lame mince où l'on observe des fossiles partiellement silicifiés. (lumière polarisée, 32X)

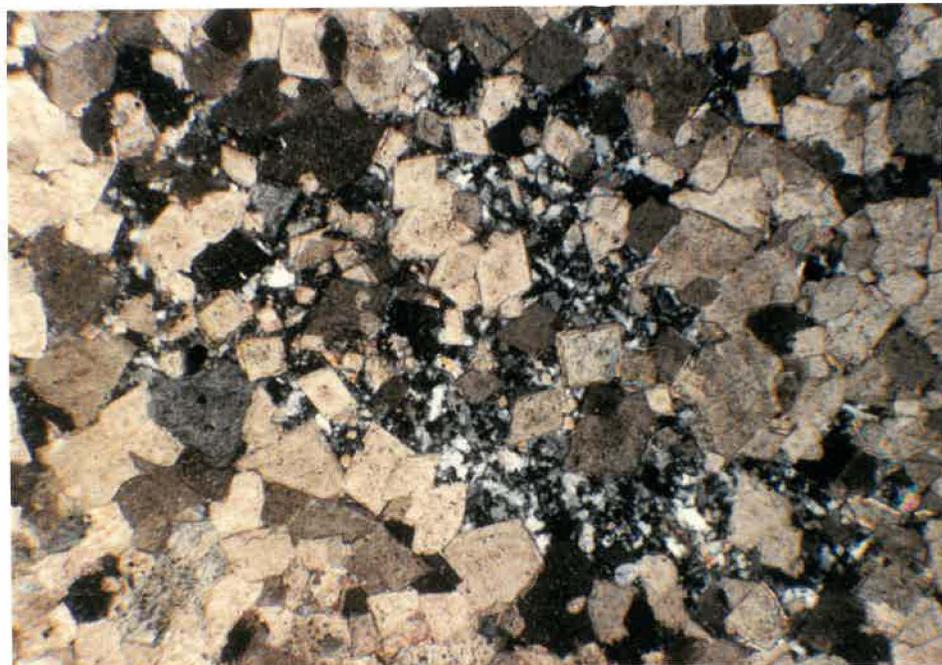


fig. 22-Photographie de la dolomie de Côteau-du-Lac en lame mince où l'on observe du chert. (lumière polarisée, 72X)

non les grains de quartz. Abet (1985) a démontré que des mini-prismes de ce grès se désintégraient rapidement lorsqu'ils étaient immergés dans une solution de soude. Il faut noter que dans la partie supérieure de cette formation, on retrouve un grès dolomitique qui ne s'est pas révélé être réactif. Celui-ci est composé des mêmes grains de quartz que chez l'orthoquartzite mais le ciment est ici dolomitique au lieu d'être siliceux. (Voir figure 24)

D. Calcaire de St-Jean

Ce calcaire provient de la formation de Montréal du groupe de Trenton datant de l'Ordovicien moyen (Clark, 1955).

De couleur gris foncé, il est cristallin à grain fin à moyen. Il est riche en fossiles, surtout des échinodermes et des brachiopodes. On rencontre des grains de quartz et un peu de calcédoine. Cette dernière peut représenter jusqu'à 2% de l'ensemble.

Ces calcaires sont contemporains de ceux qu'on retrouve à Montréal et qui se sont révélés réactifs aux

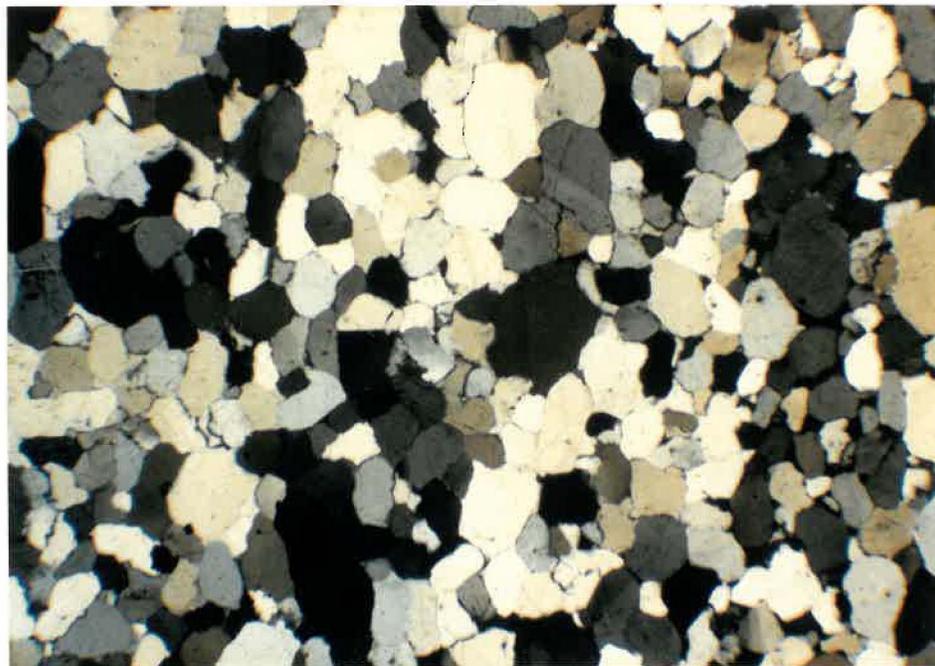


fig. 23-Photographie de l'orthoquartzite de Beauharnois en lame mince. Le ciment siliceux est en continuité optique avec les grains de quartz. (lumière polarisée, 32X)

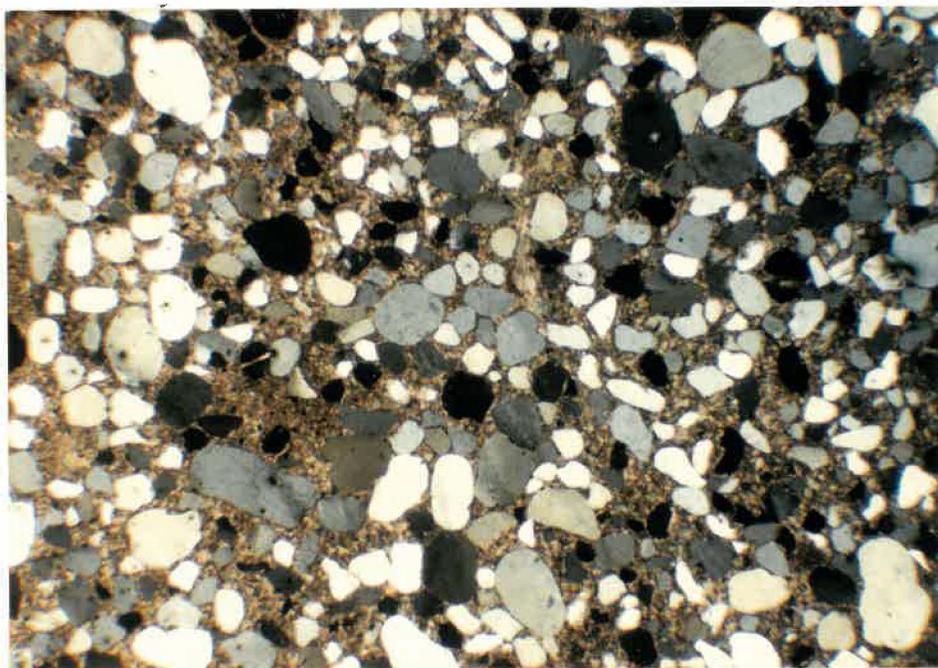


fig. 24-Photographie du grès dolomitique en lame mince. (lumière polarisée, 72X)

alcalis. La cause de la réactivité est ici la calcédoine.
(voir figure 25)

E. Syénite de Varennes

La syénite de Varennes est une intrusion basique d'âge Cénozoïque reliée aux intrusions Montérégiennes (Clark, 1955).

Cette syénite gris-verdâtre présente d'excellentes propriétés physiques. On note la présence de néphéline, d'albite, d'aégyrine, un pyroxène alcalin, et d'un peu d'orthose et de sodalite. (voir figure 26)

Ce granulats basique est très stable chimiquement face à une solution basique et ne démontre donc pas d'évidence de réactivité aux alcalis. Il sera donc un de nos granulats-repères.

F. Calcaire de Laval

Ce calcaire provient du membre de St-Martin de la formation de Laval dans la partie supérieure du groupe de

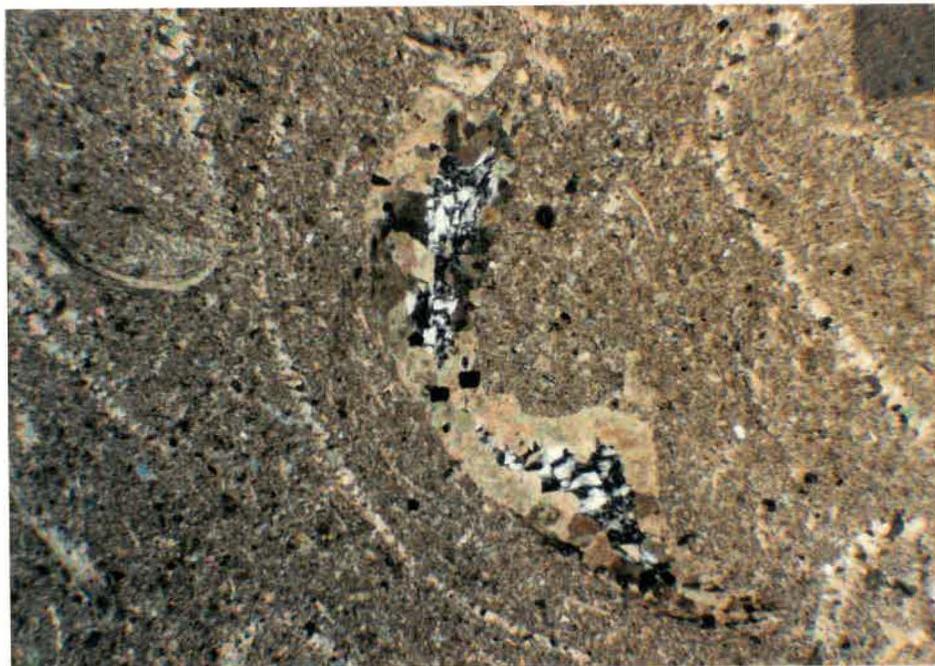


Fig. 25-Photographie du calcaire de St-Jean en lame mince où l'on observe du chert. (lumière polarisée, 72X)

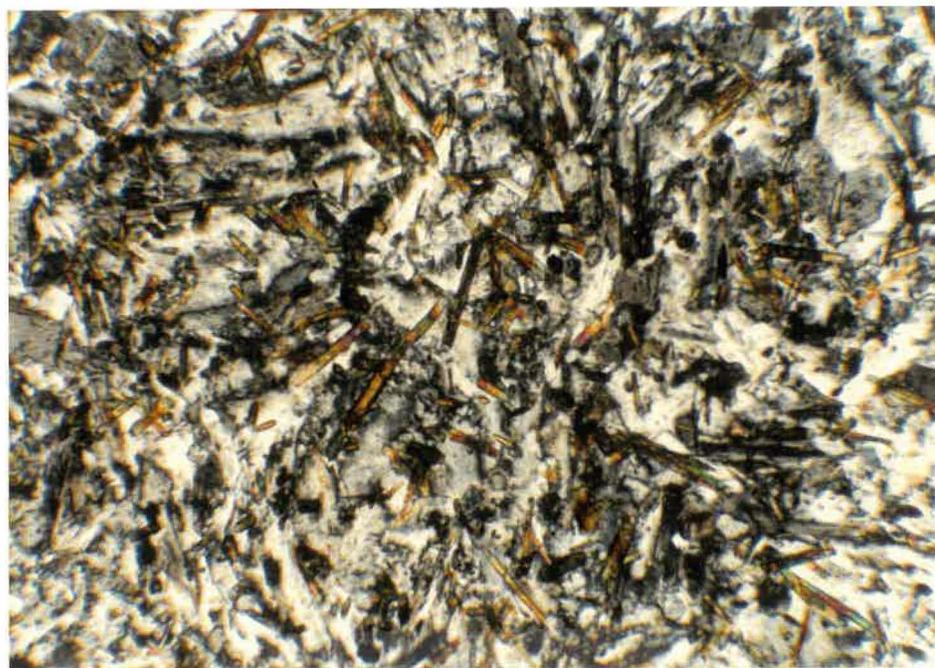


Fig. 26-Photographie de la syénite de Varenne en lame mince. (lumière polarisée, 72X)

Chazy (Clark, 1972).

Notre échantillon est composé d'un calcaire dolomitique cristallin. La partie calcaireuse est constituée de calcite et est riche en fossiles (brachiopodes, bryozoaires, échinodermes). On retrouve la dolomie par lits ou par "plaques" ici et là dans le calcaire. Cette dolomie est toujours riche en minéraux argileux qui peuvent constituer jusqu'à 20% de l'ensemble. Des grains de quartz et de pyrite sont observés dans ces faciès. On retrace aussi un faciès gréseux où le quartz peut représenter jusqu'à 30% de l'ensemble. Le résidu insoluble mesuré sur notre échantillon est de 30%. La figure 27 présente le calcaire dolomitique.

Les calcaires provenant du groupe du Chazy ne sont généralement pas reconnus pour être réactifs aux alcalis quoique quelques cas de faible réactivité aient déjà été relevés.

G. Gneiss de St-Hyppolyte

Ce gneiss provient de la série de Morin qui date du Précambrien (Osborne et Clark, 1960).

Les minéraux majeurs sont ici le quartz, l'orthose, la hornblende, la biotite et les plagioclases. On retrouve aussi du grenat, des carbonates, un pyroxène et de la pyrite. La gneissosité est créée par l'alignement de la hornblende et de la biotite. (voir figure 28)

Comme toutes les roches granitiques qui présentent un quartz à extinction ondulante au microscope polarisant, ce gneiss est considéré comme étant potentiellement réactif à long terme.

H. Calcaire de St-Jacques

Le calcaire de St-Jacques provient de la formation de Deschambault du groupe de Trenton d'âge Ordovicien moyen (Clark et Globenski, 1976).

Le calcaire gris-foncé est à grain fin et possède un résidu insoluble de 8.0%. La roche est riche en calcite et est plus ou moins fossilifère dépendant des échantillons observés. Lorsque ceux-ci sont abondants, on observe essentiellement des fragments de brachiopodes et d'échinodermes. On observe un peu de quartz et des nodules de chert qui peuvent atteindre 2 mm. Ce chert constitue

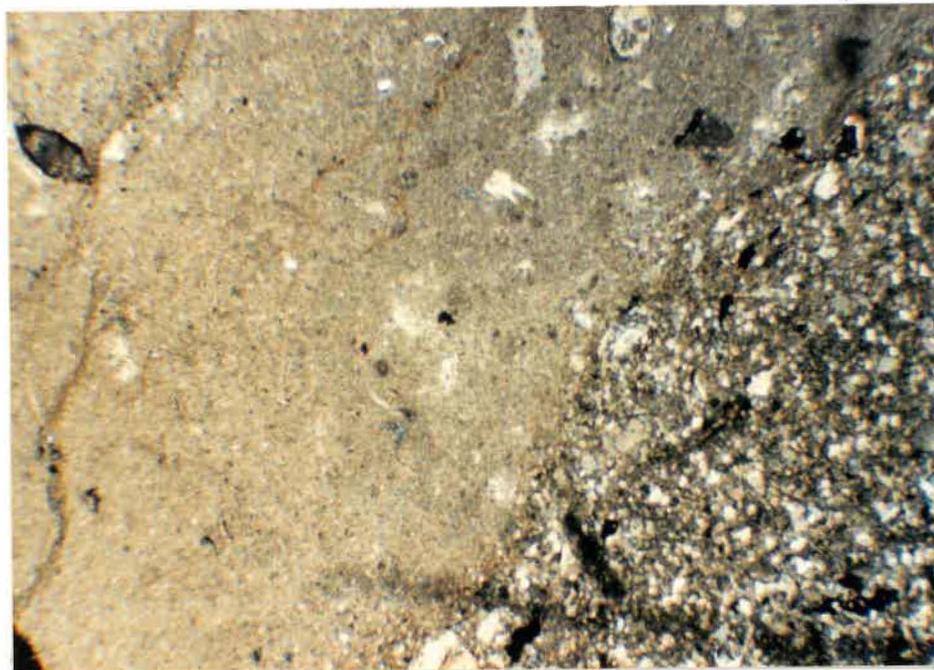


Fig. 27-Photographie du calcaire dolomitique de Laval en lame mince. (lumière polarisée, 32X)

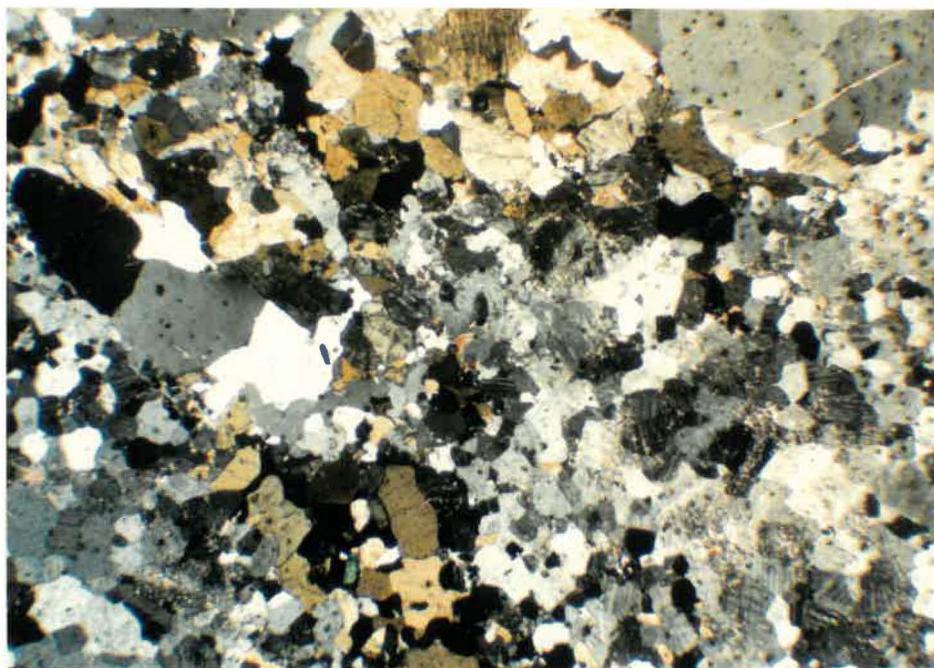


Fig. 28-Photographie du gneiss oillé de St-Hyppolyte. (lumière polarisée, 32X)

approximativement entre 1 et 2% de l'ensemble du granulat.
(voir figure 29).

Nous considérons que ce granulat possède un potentiel élevé de réactivité étant donné la présence de nodules de chert.

I. Calcaire de Berthier

Le calcaire de Berthier provient de la formation de Tétreauville du groupe de Trenton d'âge Ordovicien supérieur (Clark et Globenski, 1976).

Ce calcaire à grain fin est composé de micrite riche en minéraux argileux et en fossiles, surtout des échinodermes. (voir figure 30). On retrouve du quartz dissimulé ici et là. Le résidu insoluble atteint 18.2%.

Le potentiel de réactivité de ce faciès va de faible à moyen.

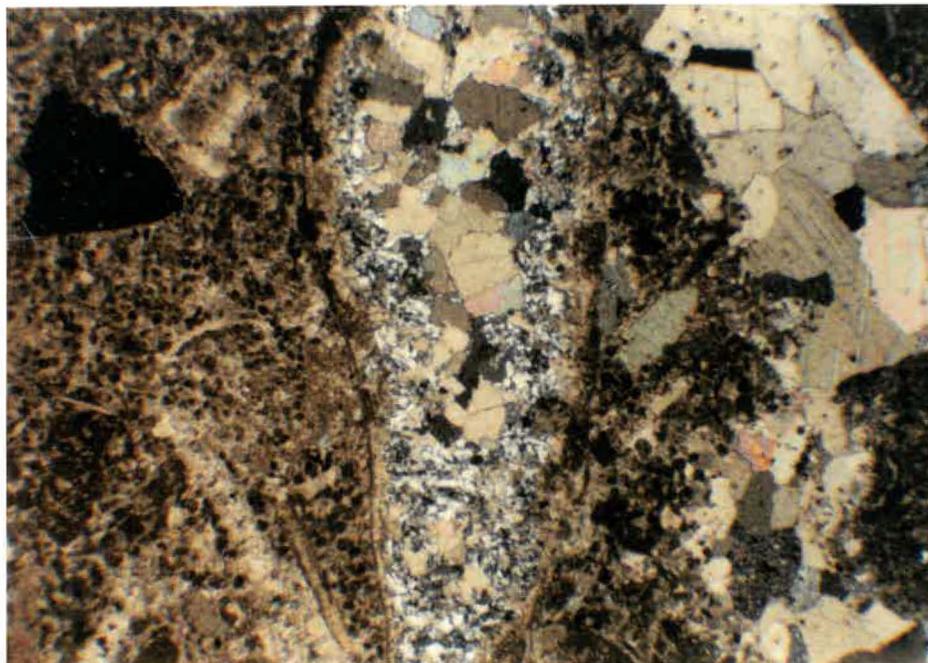


Fig. 29-Photographie du calcaire de St-Jacques en lame mince où l'on observe du chert et de la calcédoine. (lumière polarisée, 32X)



Fig. 30-Photographie du calcaire de Berthier en lame mince. (lumière polarisée, 32X)

J. Calcaire de Trois-Rivières

Le calcaire de Trois-Rivières provient du membre de St-Casimir de la formation de Neuville du groupe de Trenton de l'Ordovicien supérieur (Clark et Globensky, 1976b). Cette formation est l'équivalent du Rosemont à Montréal.

Le calcaire à grain fin est parfois très riche en fossiles. Certains de ceux-ci sont partiellement ou entièrement silicifiés. (voir figure 31). On retrouve aussi du quartz ici et là. La valeur du résidu insoluble est de 12 %.

Ce granulat a été très étudié, (Houde, 1986, Durand, 1986, 1988). Ces auteurs ont mis en évidence la forte réactivité du granulat, la réactivité étant causée par la silice située dans les fossiles.

Dû au fait que le comportement de ce granulat est maintenant bien connu, il sera un de nos granulats-repères.

K. Métavolcanique de St-Wenceslas

La seule mention de cette roche volcanique dans la littérature est attribuable à T. H. Clark (1962). Clark décrit ainsi ce faciès: " Roche basique à grain fin ou aphanitique, vert foncé, paraissant avoir été partiellement serpentinisé. La majeure partie semble manquer de structures reconnaissables mais ici et là on peut identifier des structures coussinées bien distinctes".

Ces roches proviennent de la série de St-Flavien essentiellement constituée de gabbros et de quelques roches extrusives. Notre échantillon est essentiellement constitué d'un faciès aphanitique riche en chlorite et serpentinisé par endroits. On reconnaît parfois quelques plagioclases et on note la présence d'épidote. On retrouve du quartz (voir figure 32) qui forme de petites laminations. On retrouve aussi un faciès bréchique très riche en quartz et fortement chloritisé et serpentinisé par endroits.

Il est difficile d'évaluer le comportement de ce genre de granulat dans le béton. Il sera intéressant d'observer le comportement de cette métavolcanique soumise aux

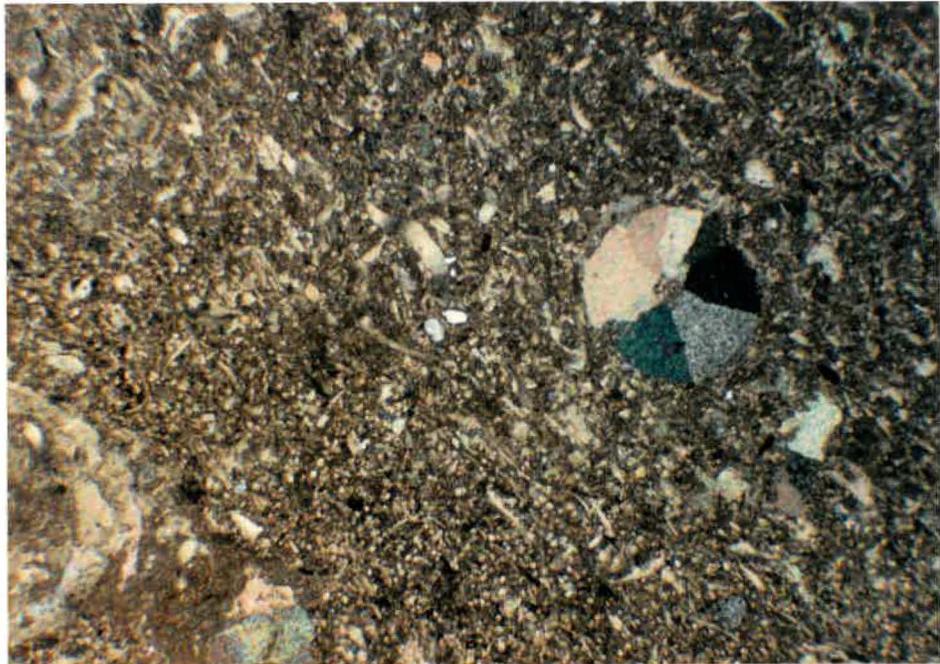


Fig. 31-Photographie du calcaire de Trois-Rivières en lame où l'on observe de petits grains de quartz. (lumière polarisée, 32X)

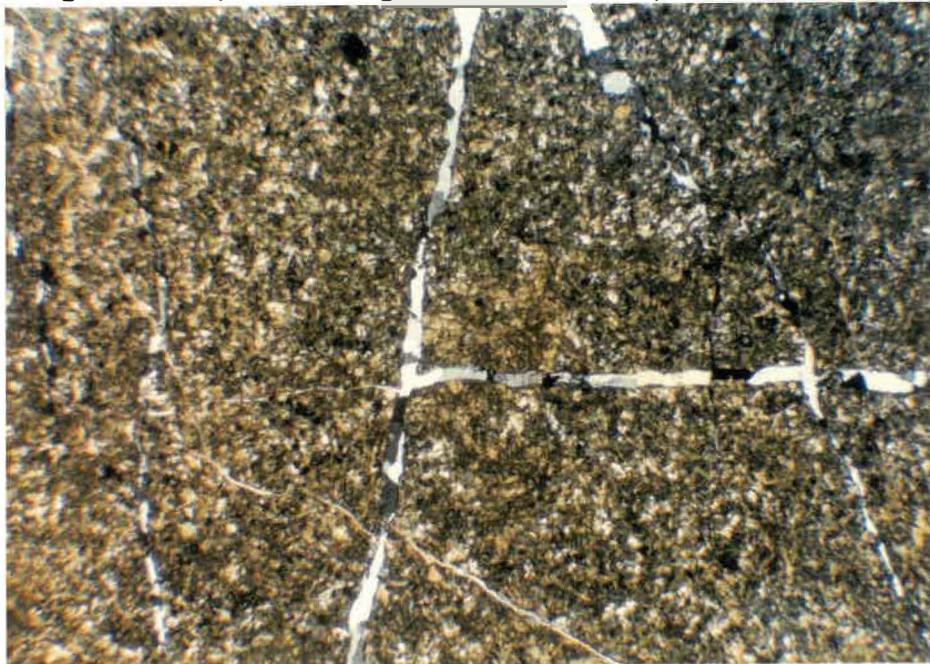


Fig. 32-Photographie de la métavolcanique de St-Wenceslas en lame mince où l'on observe de petites laminations de quartz. (lumière polarisée, 72X)

essais.

L. Basalte de St-Cyrille

Les roches basaltiques de la région de St-Cyrille, près de Drummondville, appartiennent à la formation de Bourret du groupe de Laurier de l'Ordovicien moyen (Globenski, 1978).

Le basalte est amygdalaire et de la calcite vient remplir les amygdules (voir figure 33). On retrouve aussi à l'occasion un peu de quartz accompagnant la calcite. La pâte est fortement chloritisée ce qui masque la texture originale. On peut encore à l'occasion identifier les cristaux de plagioclase. On retrouve aussi un oxyde de fer abondant par endroits.

Le basalte, une roche basique, ne réagit généralement pas en présence d'un liquide basique et alcalin et n'est donc pas réactif aux alcalis. Ce faciès sera un de nos granulats-repères.

M. Schiste chloriteux de Sherbrooke

Le schiste chloriteux trouvé près de Sherbrooke provient de la formation d'Ascott datant de l'Ordovicien moyen. Cette formation forme une importante bande d'orientation NE-SO centrée sur la ville de Sherbrooke (St-Julien et Lamarche, 1965).

Le schiste métamorphique est riche en chlorite, quartz, feldspaths, séricite et calcite. On retrouve aussi de l'actinote, de l'épidote, de la hornblende et finalement, en proportion moindre, de la magnétite et de la pyrite. (voir photo 34).

La réactivité de ce faciès a été reconnue dans de nombreuses structures de la région de Sherbrooke. Celle-ci est attribuable, selon Grattan-Bellew (1981) à la présence de petits grains de quartz présentant une extinction ondulante au microscope polarisant.

N. Tuf rhyolitique de Beauceville

Le tuf retrouvé à Beauceville provient de la formation de Beauceville du groupe de Magog (Cousineau, 1984).

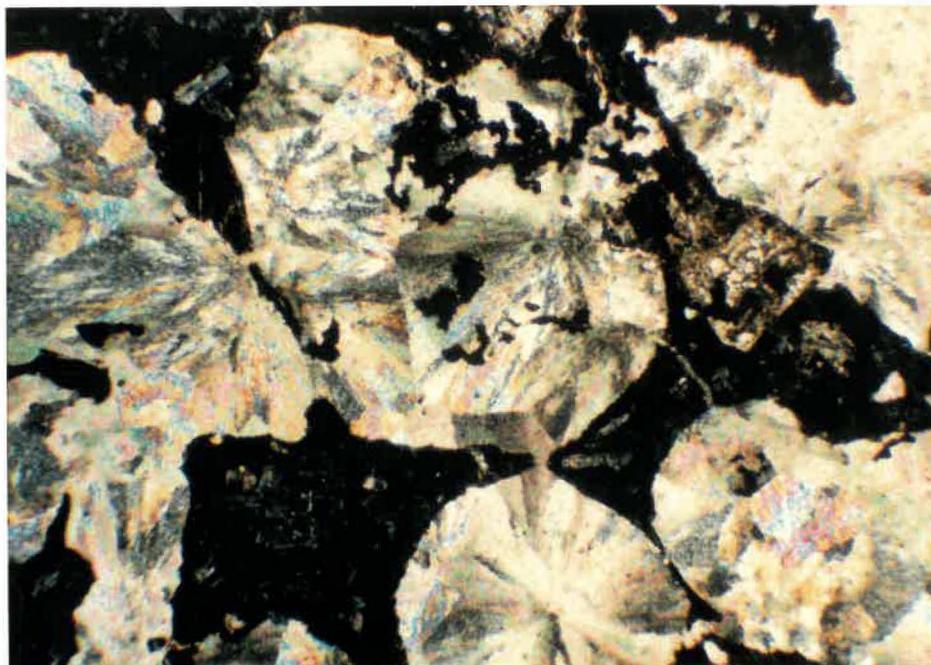


Fig. 33-Photographie du basalte de St-Cyrille en lame mince où l'on observe que les amygdules sont remplies de calcite. (lumière polarisée, 72X)

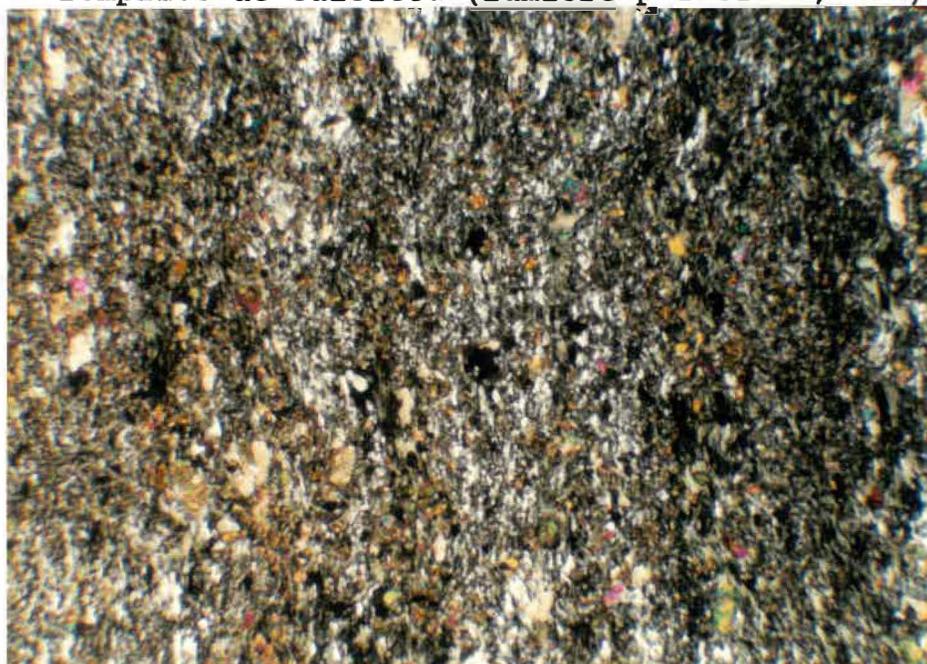


Fig. 34-Photographie du schiste chloriteux de Sherbrooke en lames minces où l'on observe beaucoup de petit grains de quartz. (lumière polarisée, 32X)

Notre échantillon est à phénocristaux de quartz, plagioclase et calcite. Le plagioclase est souvent en voie de damouritisation. Ces phénocristaux baignent dans une matrice de quartz micro-cristallin de minéraux argileux, d'épidote et de pyrite, (Voir figure 35).

La réactivité de ce granulat a été mis en évidence par Bérubé et Fournier (1987) alors qu'ils étudiaient les causes de détériorations du Barrage de Sartigan en Beauce. La réactivité est qualifiée ici de moyenne.

O. Calcaire de Charlesbourg

Le calcaire de Charlesbourg provient de la formation de Neuville du groupe de Trenton de l'Ordovicien supérieur (Dallaire, 1986).

Ce faciès de couleur pâle est à grain très fin et présente des cassures concoidales. Il est très riche en petits grains de calcite liés entre eux par une matrice siliceuse et argileuse. On observe quelques grains de quartz plus grossier et un peu de pyrite. (voir figure 36). La teneur en résidu insoluble est de 16.5%

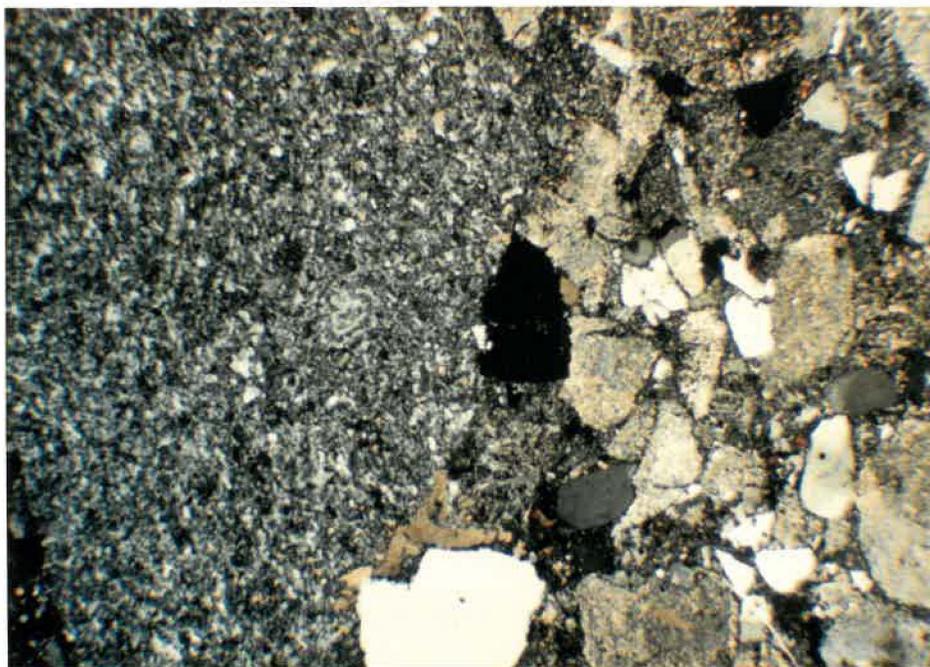


Fig. 35-Photographie du tuf rhyolitique de Beauceville en lame mince. (lumière polarisée, 32X)

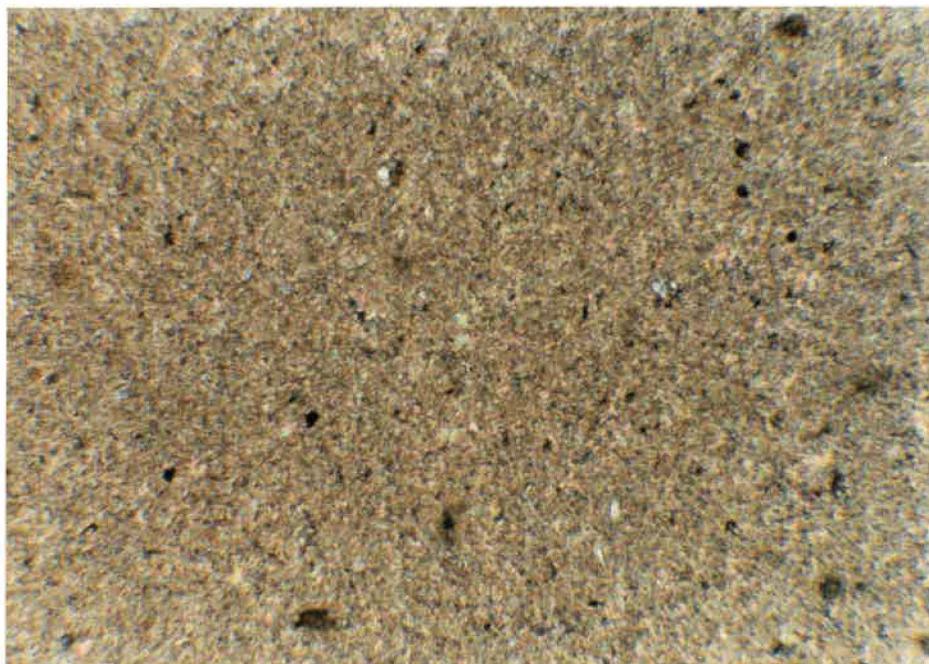


Fig. 36-Photographie du calcaire de Charlesbourg en lame mince où l'on observe de petits grains de quartz. (lumière polarisée, 32X)

Des recherches effectuées à l'Université Laval ont mis en évidence la réactivité de ce granulat qualifiée de faible (Bérubé et Fournier, 1985).

P. Calcaire de Chicoutimi

Le calcaire échantillonné à Chicoutimi provient de la formation de Leray du groupe de Black River de l'Ordovicien moyen (Benoit et Valiquette, 1971).

Deux faciès distincts caractérisent ce granulat. Un premier est un calcaire à grain fin souvent riche en micrite entourant de petits grains de calcite. Ce faciès est souvent riche en fossiles souvent partiellement silicifiés (voir figure 37). Le deuxième faciès est un calcaire cristallin fossilifère. Celui-ci représente approximativement 10% de notre échantillon. La teneur totale en résidu insoluble de cet échantillon est de 9.9%.

La présence de chert dans les fossiles silicifiés confère à ce granulat un potentiel de réactivité élevé.

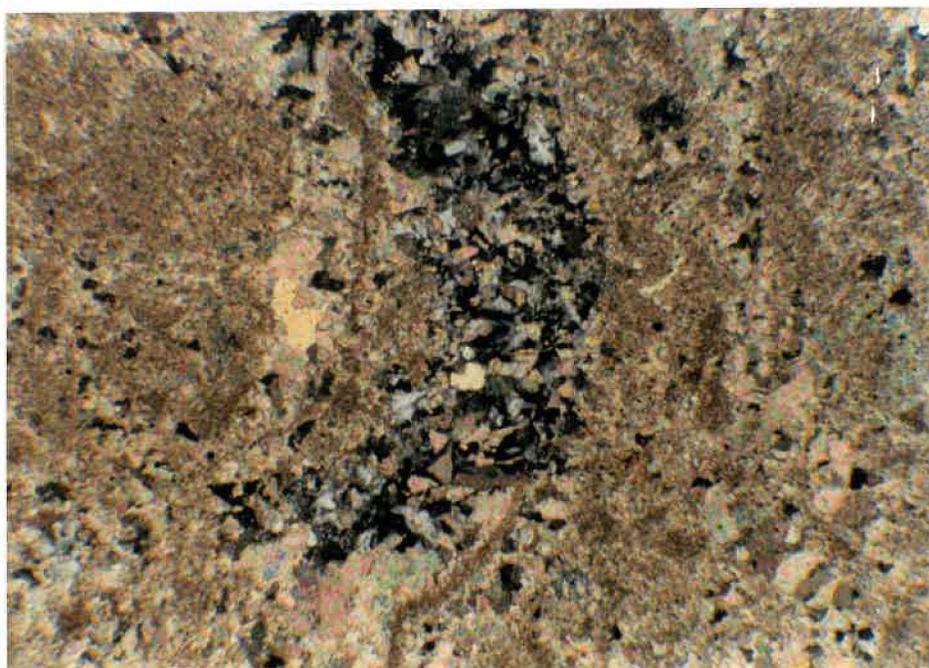


Fig. 37-Photographie du calcaire de Chicoutimi en lame mince où l'on observe du chert et de la calcédoine. (lumière polarisée, 32X)

CHAPITRE V

L'ESSAI ACCELERE

V.1: Historique de l'essai

L'essai accéléré avec barres de mortier fût initialement proposé par Van Aardt et Visser en 1982. Ils proposèrent alors l'entreposage de barres de mortier dans une solution de NaOH 1N à une température de 80⁰C. Les barres devaient être confectionnées selon les procédures fixées par la norme ASTM C-227. Les auteurs proposèrent alors un maximum d'expansion permis de 0.10% à 10 jours.

En 1986, Oberholster et Davies publièrent les résultats de leurs travaux effectués selon ce nouvel essai accéléré.

Ces auteurs ont soumis plus de 30 granulats aux conditions de cure proposée, ceci sur une période de trois ans et conclurent que cet essai rapide était fiable pour la détermination du potentiel de réactivité des granulats. Ils ont aussi vérifié les différents paramètres impliqués

pour en arriver à la conclusion que les conditions proposées par Van Aardt et Visser étaient celles qui optimisaient les allongements obtenus. Cependant les auteurs ne précisent pas en détail leur mode opératoire et en particulier l'influence du rapport eau-ciment sur leurs résultats.

V.2: Evaluation de l'essai

Dans le but de vérifier si cet essai pouvait indiquer le potentiel de réactivité des granulats québécois, nous avons entrepris à l'automne 1986 de vérifier différents facteurs pouvant affecter les allongements obtenus au cours de cet essai.

Nous avons tout d'abord pris pour acquis que la température de 80°C et la solution de NaOH 1N optimisaient les résultats d'allongements.

Pour la température, il semble que même si on obtenait des allongements plus importants à 90°C par exemple, il ne serait guère aisé de maintenir une telle température constante car on s'approche ici du point d'ébullition de

l'eau. Trop d'évaporation pourrait devenir problématique quant au maintien de la normalité de la solution. Déjà à 80°C on note une certaine évaporation et les manipulations doivent être effectuées avec le plus grand soin afin d'éviter les brûlures.

Pour ce qui est de l'ajout de NaOH au lieu de KOH, tous les travaux démontrent clairement que la soude donne des allongements plus importants, et ceci de façon significative, par rapport au KOH.

Ces deux paramètres étant fixés nous avons décidé de vérifier certains points additionnels qui semblaient avoir été moins étudiés. Ces paramètres sont: l'impact de la normalité de la solution, l'influence de la période de refroidissement des échantillons lors de la prise des mesures à l'air libre, l'évolution de la normalité de la solution durant l'essai, la reproductibilité de l'essai, l'impact du rapport eau-ciment sur les résultats et finalement, l'influence du type de contenant utilisé.

V.2.1: Impact du temps de mesure

Oberholster et Davies (1986) mentionnent que les

mesures des échantillons sont prises avant que tout refroidissement significatif n'intervienne. Ceux-ci prennent donc leurs mesures dans un délai de sept secondes après la sortie de l'échantillon.

Cette procédure nous semblait difficile à respecter. Ainsi, il y a un problème de sécurité évident. Lorsque l'on sort les échantillons de leur solution à 80°C ceux-ci sont évidemment très chauds et sont ruissellants de soude. Il est inutile de rappeler ici la corrosivité de cette solution. Il est donc à déconseiller d'effectuer des mouvements rapides avec de tels échantillons. Il faut plutôt les manipuler lentement et de façon sécuritaire. Il y a aussi le fait que si l'on place immédiatement après sa sortie l'échantillon sur l'appareil de mesure, beaucoup de soude s'y dépose et il y a risque d'abîmer l'appareil.

Mis à part le facteur sécurité, il faut considérer le taux de refroidissement. Lorsque l'échantillon passe de 80° à la température de la pièce, il est évident qu'il ne subit pas un choc thermique mais il est indéniable que le taux de refroidissement est plus rapide au cours des premières secondes qu'au cours des minutes qui suivent; si on se risque à vouloir prendre les mesures dans les premières secondes, tout écart à la procédure se

traduirait par un écart important dans les résultats. Cependant si on attend que le taux de refroidissement de l'échantillon soit devenu faible, les variations possibles dans les mesures seront moins importantes et les résultats plus fiables.

Il est donc nettement préférable qu'il y ait un délai entre la sortie des échantillons et la prise de la mesure. Pour des raisons de sécurité et de précision des mesures nous avons opté pour un délai de quinze minutes avant d'effectuer la mesure, ce qui nous a paru acceptable. Ainsi les échantillons retirés du contenant sont déposés sur une table recouverte de tissus absorbant jusqu'à la prise de mesure, soit quinze minutes plus tard. Même après ce lapse de temps, les échantillons sont encore trop chauds pour être manipulés sans désagrément à mains nues.

Il est recommandé de demeurer très constant dans le mode opératoire et de veiller à ce que le délai soit toujours le même. Nous avons tenté des essais selon deux procédures (mesures à 15 secondes et à 15 minutes) et nous n'avons observé aucun changement significatif dans les résultats, sauf un écart type plus grand entre les échantillons mesurés à 15 secondes.

V.2.2: Evolution de la solution de soude

Lors de la cure de 14 jours avec les barres de mortier et de 24 jours avec les prismes de béton, on observe une baisse du niveau de la solution qui est, en moyenne, de 10%. Cette perte est attribuable en partie à une légère évaporation ainsi qu'aux manipulations des échantillons.

Face à cette situation deux solutions s'offraient à nous: soit maintenir un niveau constant en rajoutant de la solution NaOH 1N, soit de ne rien faire, pourvu que les échantillons demeurent submergés.

Il nous est apparu que la normalité des solutions variait fort peu durant l'essai. (voir figure 38). Il semble que celle-ci demeure à 1N pour la moitié de la durée de l'essai pour ensuite diminuer légèrement, pour atteindre, en moyenne, une valeur de 0.94N à quatorze jours.

Il nous semble donc superflu de vouloir maintenir un niveau constant de solution car l'ajout de solution 1N vient plutôt perturber l'évolution normale de la solution.

ESSAI ACCELERE (BARRES) EVOLUTION DE LA NORMALITE

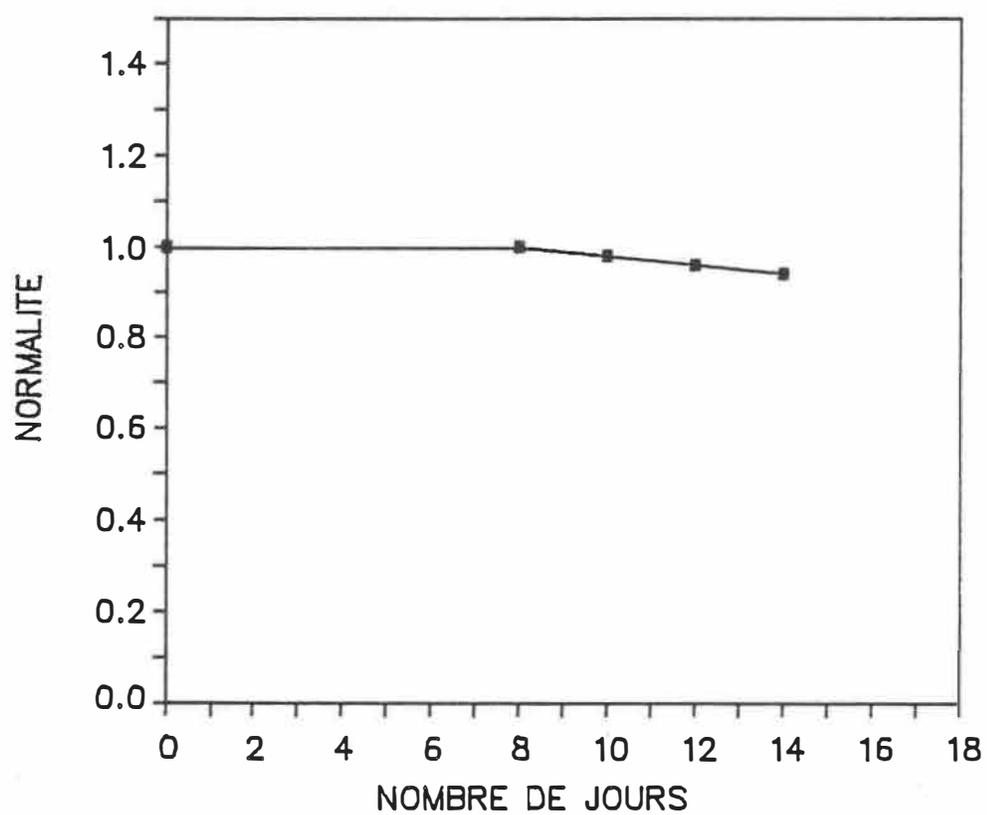


Fig. 38-Evolution de la normalité de la solution lors de l'essai accéléré.

V.2.3: Impact de la concentration de la solution

Oberholster et Davies ont déterminé qu'une normalité de 1N donnait des pourcentages optimaux d'allongement. Leurs essais couvraient des normalités variant entre 0.5 et 1.5.

Afin de vérifier ces conclusions nous avons effectué des essais avec des normalités de 0.6, 1.0 et 1.4.

Nous n'avons pas trouvé d'optimum à 1 N. La relation est plutôt linéaire entre les allongements et la normalité de la solution et ceci avec les barres de mortier et les prismes de béton. La figure 39 montre les résultats obtenus avec les barres de mortier tandis que la figure 40 montre les résultats obtenus avec les prismes de béton. Dans les deux cas une normalité plus élevée correspond à un allongement plus important.

Il faut cependant noter qu'il est plus délicat de maintenir une normalité aussi élevée que 1.4N à un niveau constant.

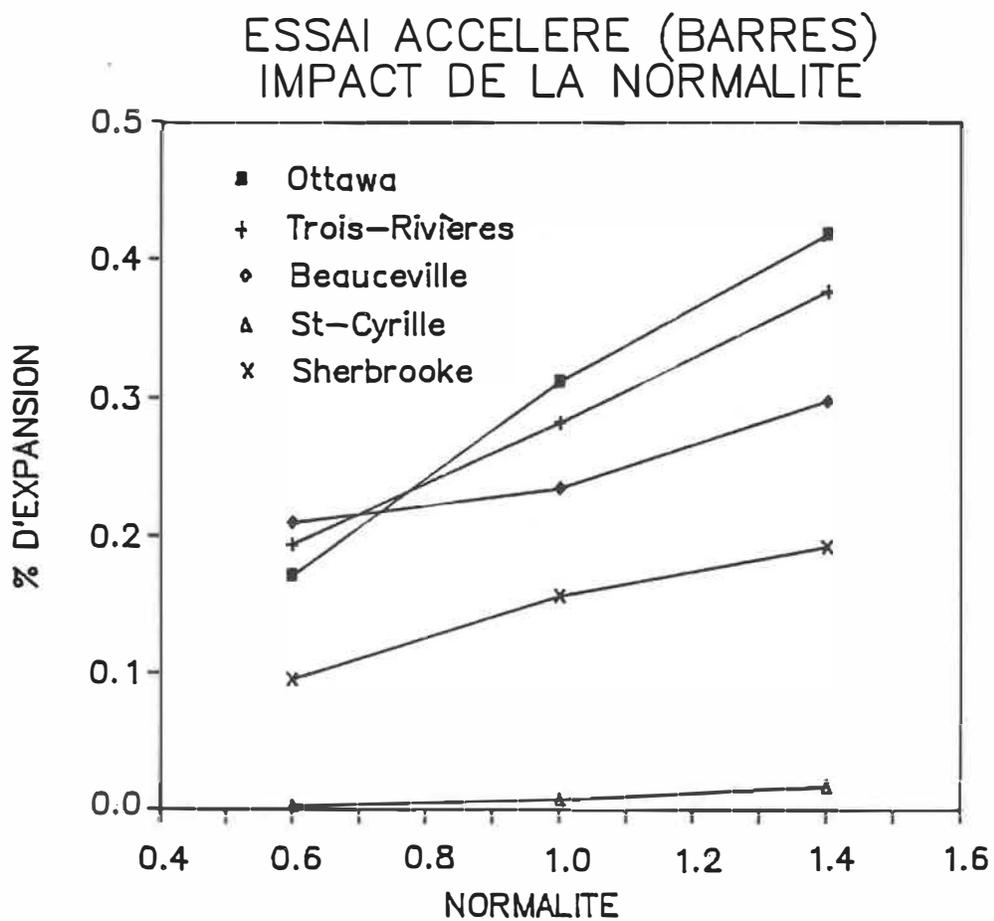


Fig. 39-Impact de la normalité de la solution lors de l'essai accéléré avec barres de mortier.

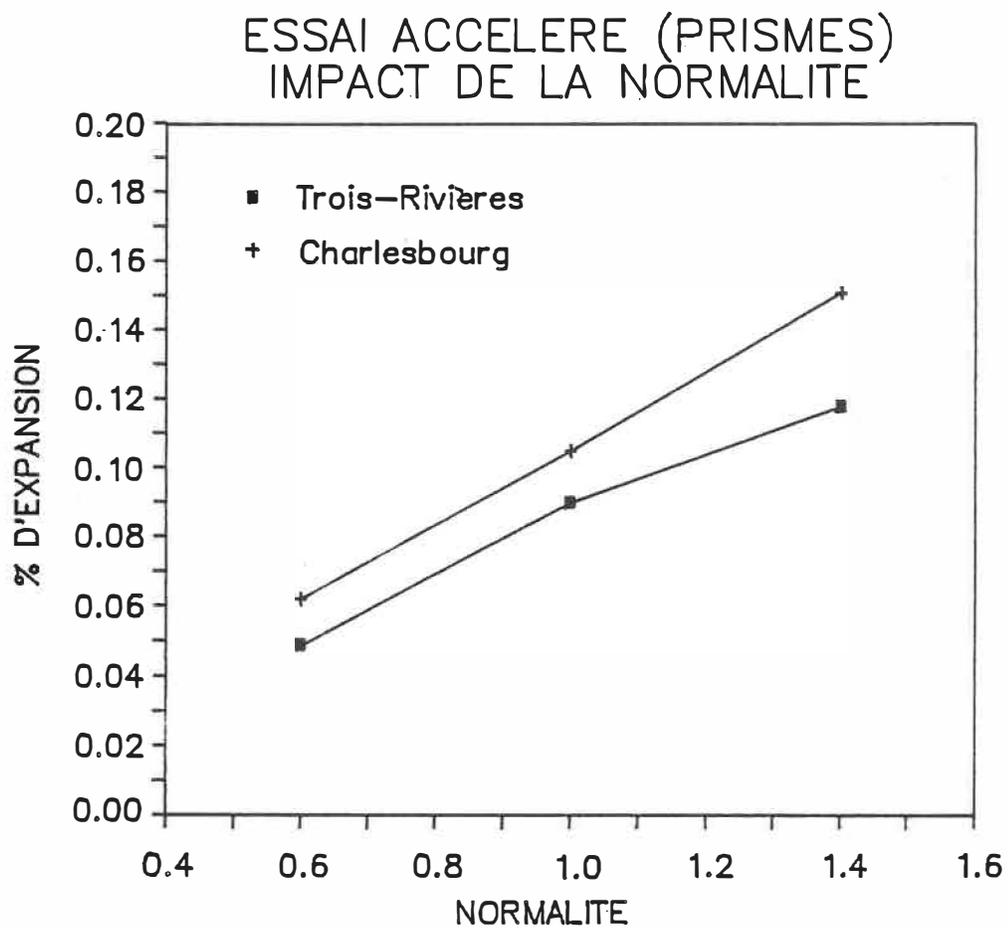


Fig. 40-Impact de la normalité de la solution lors de l'essai accéléré avec prismes de béton.

V.2.4: Impact du rapport eau-ciment

Il est apparu, au début de nos travaux, que la porosité des échantillons soumis à l'essai était un des facteurs qui affectait directement les résultats. Plus la soude peut rejoindre facilement les particules siliceuses réactives, plus la réaction sera importante et rapide.

En se basant sur ce fait il devenait inapproprié d'utiliser les méthodes comme l'étalement et l'affaissement pour fixer le rapport eau-ciment de nos échantillons. Nous avons donc utilisé un rapport eau-ciment distinct pour les barres de mortier et un pour les prismes de béton.

Pour les barres de mortier, nous avons expérimenté deux rapports eau/ciment, soit 0.45 et 0.50. Nous n'avons pas expérimenté un rapport plus élevé car ceci aurait pu entraîner un début de ségrégation lors de la mise en place et causer des écarts dans les résultats. Les résultats des mélanges à 0.45 et ceux à 0.50 sont présentés aux figures 41 et 42. On constate qu'un rapport eau/ciment plus élevé provoque de plus grands allongements, dû à la plus grande accessibilité des alcalis aux centres réactifs.

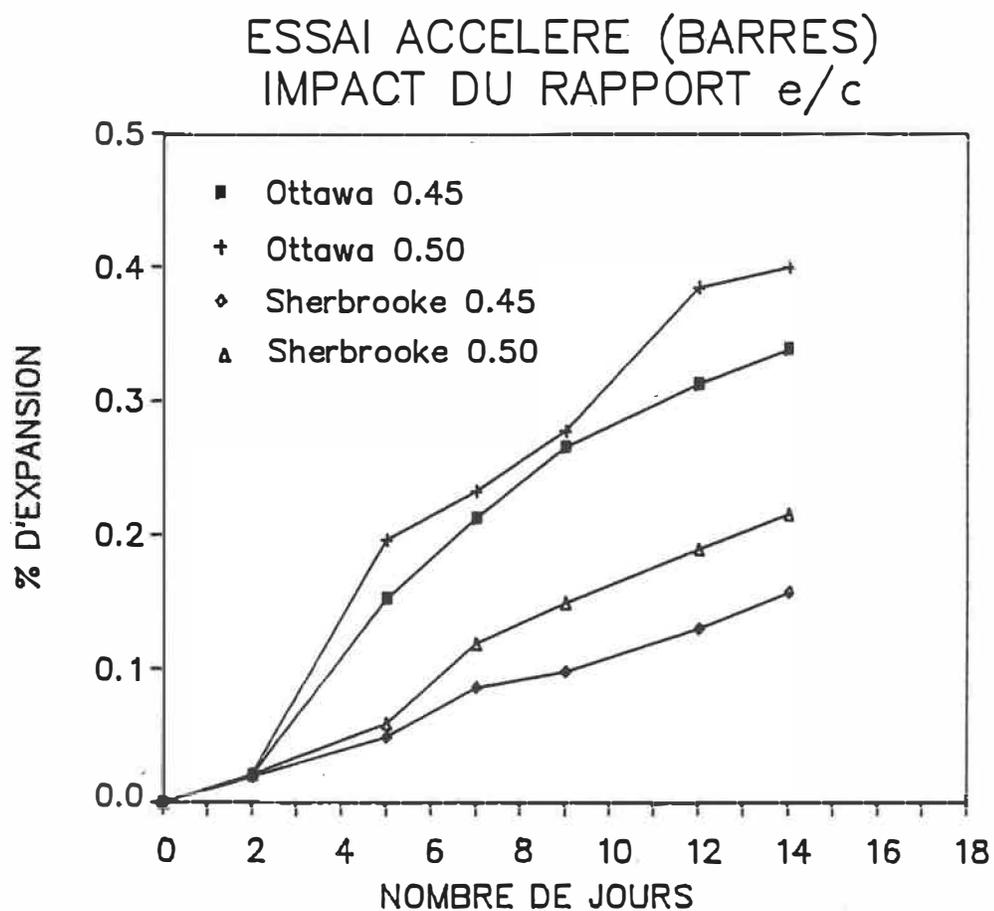


Fig. 41-Impact du rapport eau-ciment sur les résultats de l'essai accéléré avec barres de mortier, granulats d'Ottawa et de Sherbrooke.

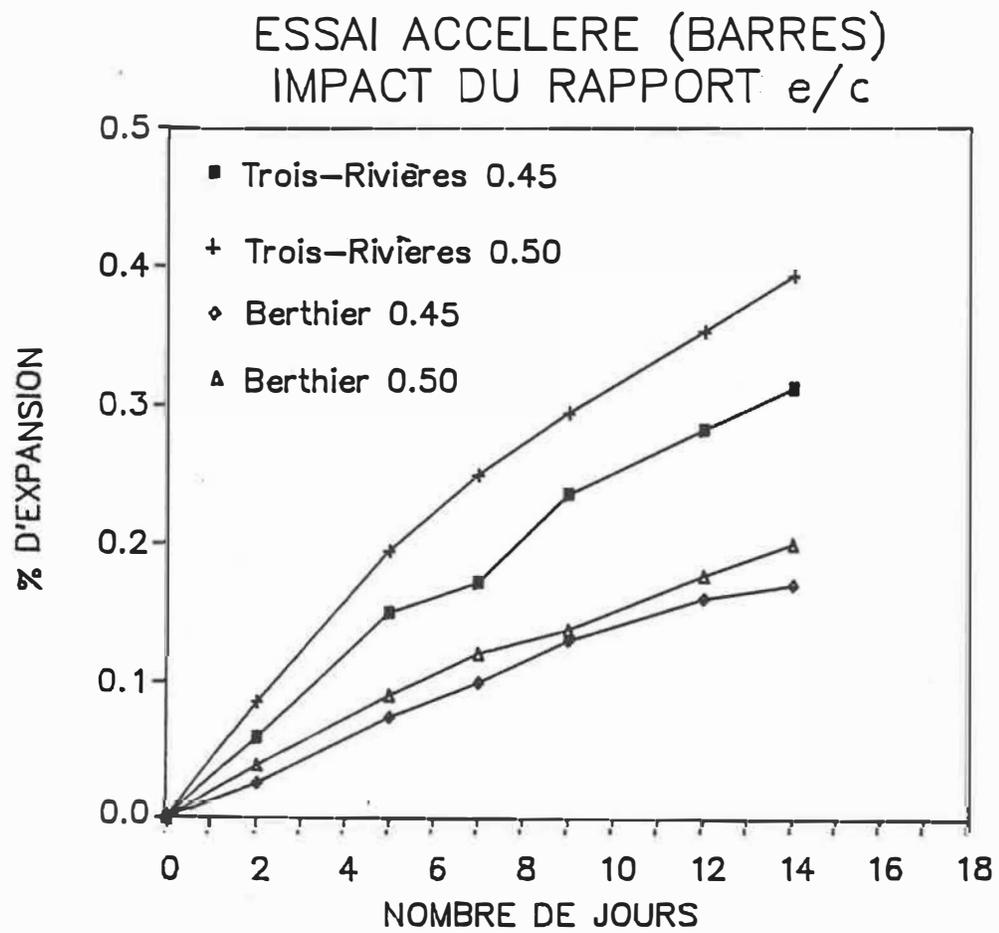


Fig. 42-Impact du rapport eau-ciment sur les résultats de l'essai accéléré avec barres de mortier, granulats de Trois-Rivières et de Berthier.

Pour les prismes de béton nous n'avons pas expérimenté différents rapport eau/ciment préférant le fixer à 0.50.

V.2.5: Influence des contenants

Chacun des échantillons était entreposé dans un contenant individuel afin d'éviter les problèmes possibles de contamination ou de mauvais dosage d'une solution.

Il fallut trouver un matériau résistant aux hautes températures et à l'agressivité d'une solution alcaline. Comme les contenants de métal ou de verre ne convenaient pas, nous nous sommes donc tournés vers les résines. D'après nos essais, le polypropylène et le polyéthylène haute densité supportent très bien ces conditions difficiles. D'autres polymères résistent aussi très bien mais elles sont plus dispendieuses.

Des essais ont été effectués avec des contenants horizontaux et verticaux pour vérifier si la position des échantillons influençait les résultats. Pour un mélange identique et dont la moitié subit la cure dans des contenants verticaux et l'autre moitié dans des contenants horizontaux les résultats sont les mêmes compte tenu de la



Fig. 43-Réceptacle utilisé lors de la cure de l'essai accéléré sur barres de mortier.



Fig. 44-Réceptient vertical utilisé lors de la cure de l'essai accéléré sur prismes de béton.



Fig. 45-Réceptient horizontal utilisé lors de la cure de l'essai accéléré avec prismes de béton.

variabilité des résultats.

La figure 43 montre le genre de contenant que nous avons retenus pour les essais sur barres de mortier. Les figures 44 et 45 illustre les deux genres de contenant utilisés pour les essais sur les prismes de béton.

V.3: Mode opératoire

Après avoir investigué les paramètres influençant les résultats, nous avons adopté des modes opératoires distincts pour l'essai accéléré avec les barres de mortier et les prismes de béton.

V.3.1: Essai accéléré avec barres de mortier

Les barres ont été confectionnées selon les procédures fixées par la norme ASTM C-227 exception faite du rapport eau-ciment. L'essai d'étalement préconisé par la norme américaine fut remplacé en fixant un rapport eau-ciment constant de 0.45. Le tableau 4 indique le dosage utilisé. On notera que les alcalis ont été augmentés

CIMENT: Lafarge type 10 (0.9% Na₂O equ.)
ADDITIF CHIMIQUE: NaOH
EAU: distillée

DOSAGE (POUR DEUX BARRES):

-CIMENT:	300 g	
-NaOH:	1.35 g	
-EAU:	135 ml	
-GRANULAT:	tamis 8 (4.75 mm)	67.50 g
	" 16 (2.36 mm)	168.75 g
	30 (1.18 mm)	168.75 g
	50 (600 μm)	168.75 g
	100 (300 μm)	101.25 g

DETAILS:

-RAPPORT EAU-CIMENT: 0.45
 -RAPPORT CIMENT-GRANULAT: 0.44
 -AVEC L'AJOUT DE NaOH, LES ALCALIS PASSENT A 1.25%
 -LES PROCEDURES DE LA NORME ASTM C-305 SONT SUIVIES
 LORS DU MELANGE

Tableau 4: Caractéristiques du mélange utilisé lors des essais avec barres de mortier.

artificiellement à 1.25% avec un ajout de NaOH à l'eau de gâchage.

Cependant, étant donné la grande accessibilité des alcalis provenant de la solution dans laquelle sont immergés les échantillons de mortier et de béton lors de l'essai, il semble que le pourcentage d'alcalis fixé pour le mélange ne soit pas critique.

Après la mise en place, les échantillons sont placés dans une chambre maintenue à 23⁰C et 95% d'humidité relative pour une période de 24 heures. Après cette cure, on procède au démoulage et on effectue une mesure à titre indicatif. Les barres sont placées dans leur contenant remplis d'eau distillée et l'ensemble est déposé dans une cuvette dont la température est de 80⁰C. Après 24 heures, les barres sont retirées de leur contenant et déposées sur une table recouverte de tissus absorbant pour une période de 15 minutes suite à laquelle la mesure initiale est prise pour chacun des échantillons. Après cette mesure, les barres sont retournées à leur contenant rempli d'une solution de NaOH 1N déjà à 80⁰C. Les mesures subséquentes sont prises après 2, 5, 7, 9, 12 et 14 jours de cure. La lecture de référence est prise le douzième jours. La cure se poursuit 2 jours supplémentaires afin de vérifier s'il

y a évolution ou stabilisation de l'expansion.

V.3.2: Essai accéléré avec prismes de béton

Les prismes sont confectionnés selon les procédures fixées par la norme A23.2-14A de l'ACNOR, exception faite du rapport eau-ciment que nous avons fixé à 0.50. L'ACNOR fixe le rapport eau/ciment du mélange en se basant sur l'affaissement. Le tableau 5 donne les caractéristiques de notre mélange type.

La procédure est essentiellement la même que pour les barres de mortier sauf pour ce qui est de la durée de la cure. Ici, une cure de 24 jours est proposée et le maximum d'expansion permis est alors de 0.04%. Des mesures sont prises après 2, 5, 7, 9, 12, 14, 18, 20 et 24 jours de cure. La durée de 24 jours de cure n'est pas le fait du hasard. C'est après avoir effectué plusieurs essais d'une durée d'une quarantaine de jours que cette durée a été adoptée. Cette période de cure permet une bonne ségrégation des granulats selon leur réactivité et est donc justifiée.

Les figures 46 et 47 illustrent les appareils de

CIMENT: Lafarge type 10 (0.9% Na₂ équ.)
ADDITIF CHIMIQUE: NaOH
EAU: distillée

DOSAGE (POUR TROIS PRISMES):

-CIMENT:	2800 kg		
-NaOH:	12.5 kg		
-EAU:	1400 ml		
-SABLE	6700 kg		
-GRANULAT:	passant	tamis 20	
	retenu	tamis 14	3800 kg
	"	tamis 10	3800 kg
	"	tamis 5	3800 kg

	total		11400 kg

DETAILS:

-VOLUME DU MELANGE: 0.008991 m³
 -DOSAGE DU CIMENT: 311 kg/m³
 -RAPPORT GRANULAT/SABLE: 63.0 %
 -RAPPORT EAU-CIMENT: 0.50
 -AVEC L'AJOUT DE NaOH, LES ALCALIS PASSENT
 A 1.25%
 -LES GRANULATS SONT LAVES ET SECHES AVANT
 LE MELANGE
 -LA TAILLE DES PRISMES EST DE 75 x 100 x 300 mm

Tableau 5: Caractéristiques du mélange utilisé lors des essais avec prismes de béton.

mesure dont nous nous sommes servis lors de nos essais.

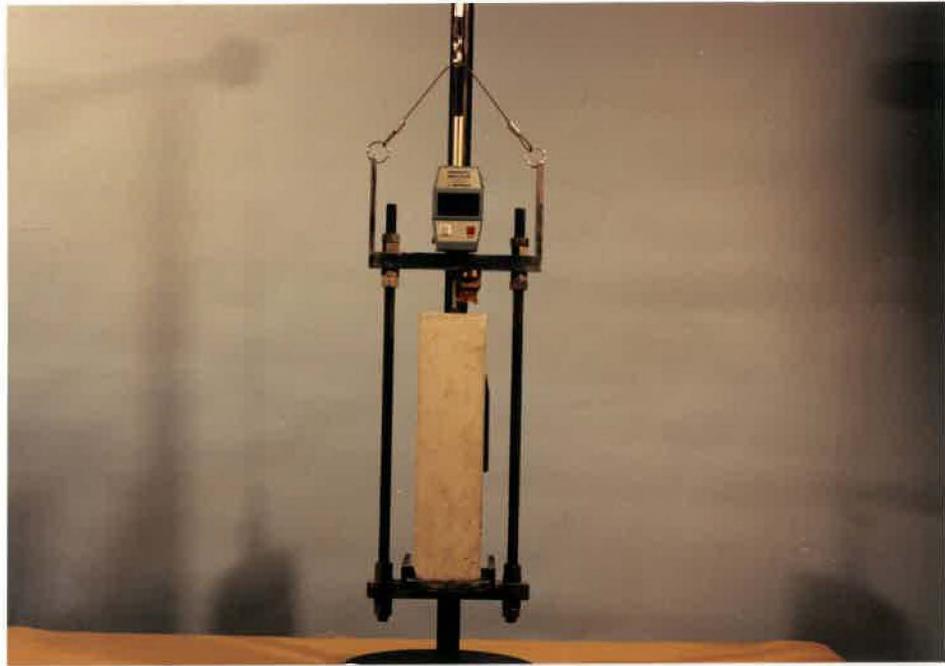


Fig. 46-Appareil de mesure utilisé pour les barres de mortier.



Fig. 47-Appareil de mesure utilisé pour les prismes de béton.

CHAPITRE VI

LES RESULTATS

VI.1: Résultats des essais normalisés

VI.1.1: ASTM C-289

Nous avons effectué des essais chimiques selon la norme ASTM C-289 sur l'ensemble des roches étudiées. Dans le cas des calcaires ces essais ont été fait sur la fraction insoluble seulement, tel que suggéré par Bérard et Roux (1986).

En reportant les résultats sur le graphique de la norme (voir figure 48), on note qu'un seul des échantillons, soit l'orthoquartzite de Beauharnois, se retrouve du côté réactif, que sept autres sont du côté non réactif et que les neuf derniers sont du côté potentiellement réactif. Dans ce dernier groupe, les essais ont été réalisés sur la fraction insoluble des calcaires.

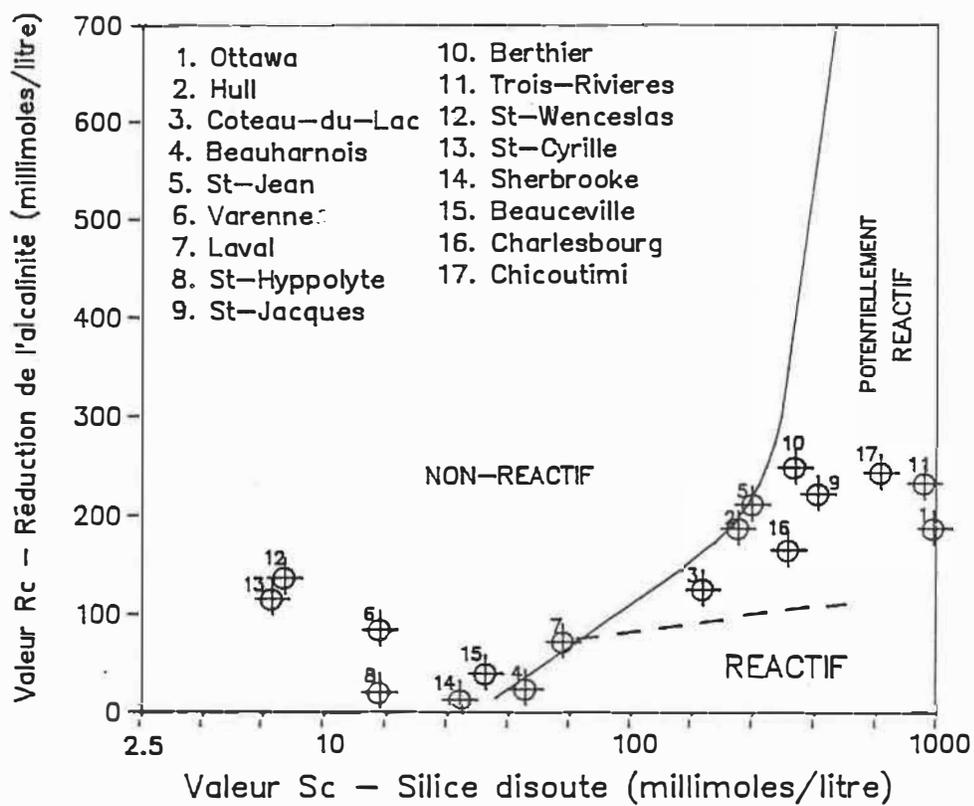


Fig. 48-Résultats des essais ASTM C-289.

Il va de soi que les résultats ainsi obtenus ne constituent pas un diagnostic d'acceptabilité ou de refus puisque l'analyse ne porte que sur un concentré de substances potentiellement réactives. D'autres essais seront donc requis afin de déterminer le comportement de la roche entière face aux alcalis.

VI.1.2: Essais avec barres de mortier (ASTM C-227)

Les résultats de nos essais avec barres de mortier sont présentés aux figures 49 à 52. Ces essais portent sur une période d'un an même si la norme spécifie des limites d'allongements pour des cures de six mois.

Les allongements s'échelonnent entre un minimum de 0.013% pour le basalte de St-Cyrille et un maximum de 0.186% pour le calcaire d'Ottawa. D'après les critères de cette norme, i.e., 0.10% d'allongement à six mois, seuls les granulats d'Ottawa et de Trois-Rivières seraient réactifs. Même si on considérait une limite de 0.10% à un an, aucun autre granulats ne dépasserait cette valeur. On observe d'ailleurs que les allongements obtenus entre six et douze mois sont, la plupart de temps, minimes.

On observe que plusieurs des allongements oscillent

BARRES DE MORTIER ESSAI ASTM C-227

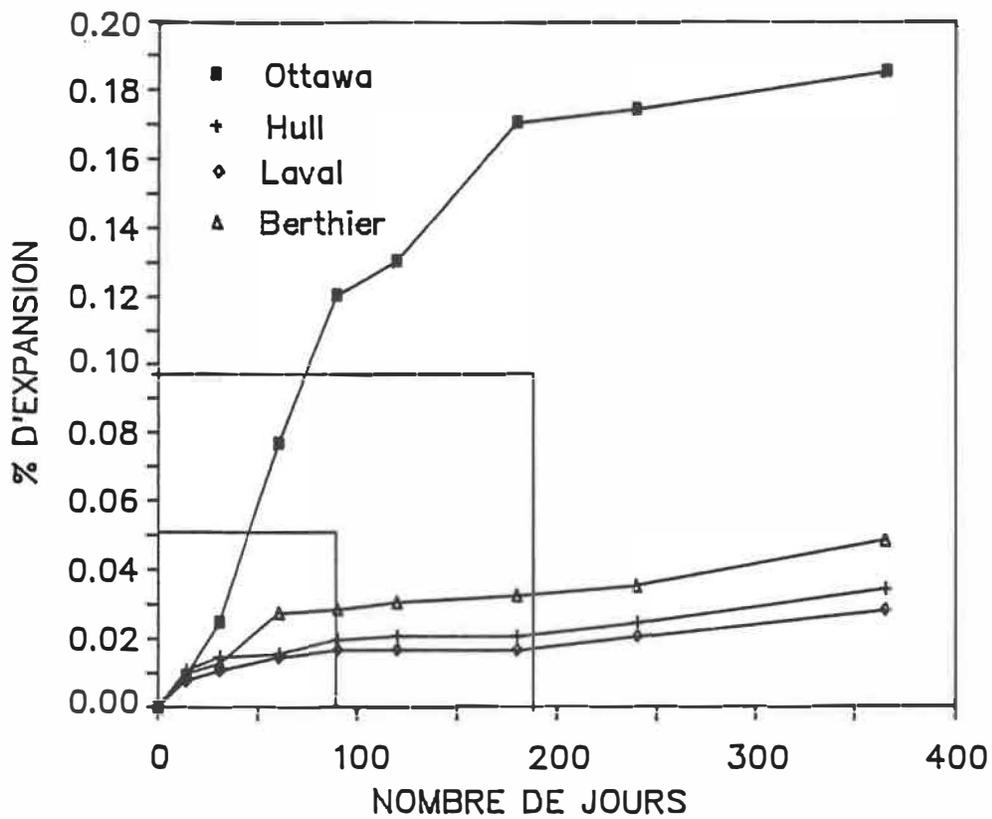


Fig. 49-Résultats des essai ASTM C-227, granulats d'Ottawa, Hull, Laval et Berthier.

BARRES DE MORTIER ESSAI ASTM C-227

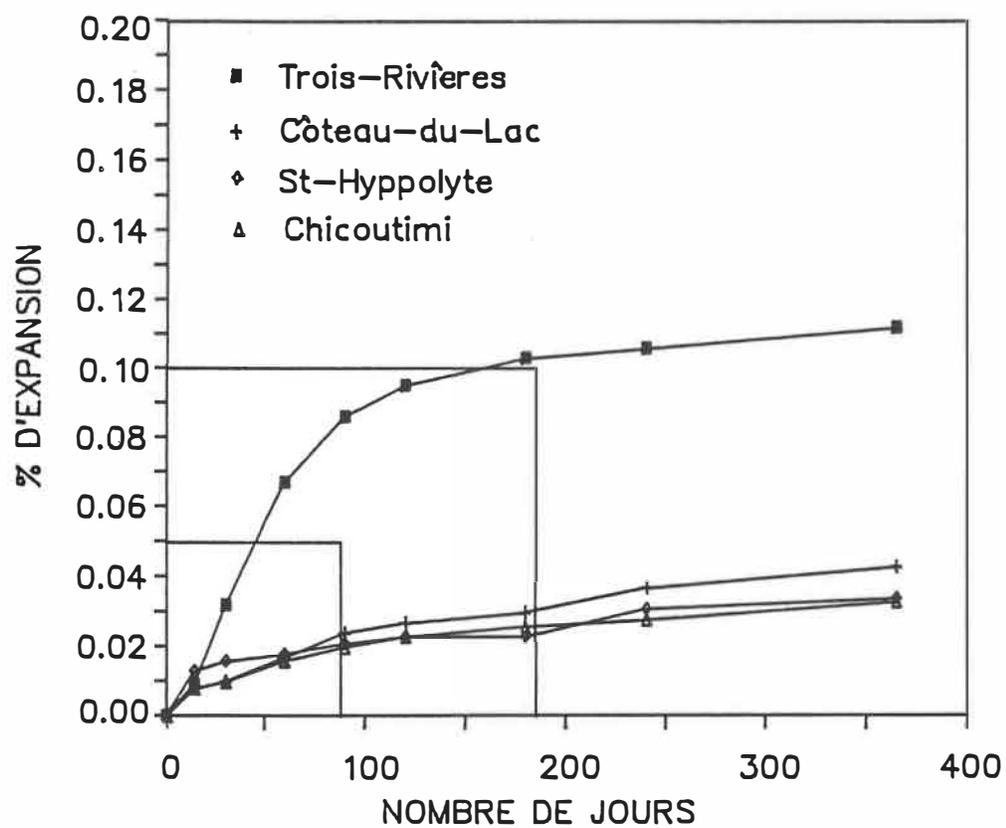


Fig. 50-Résultats des essais ASTM C-227, granulats de Trois-Rivières, Côteau-du-Lac, St-Hyppolyte et Chicoutimi.

BARRES DE MORTIER ESSAI ASTM C-227

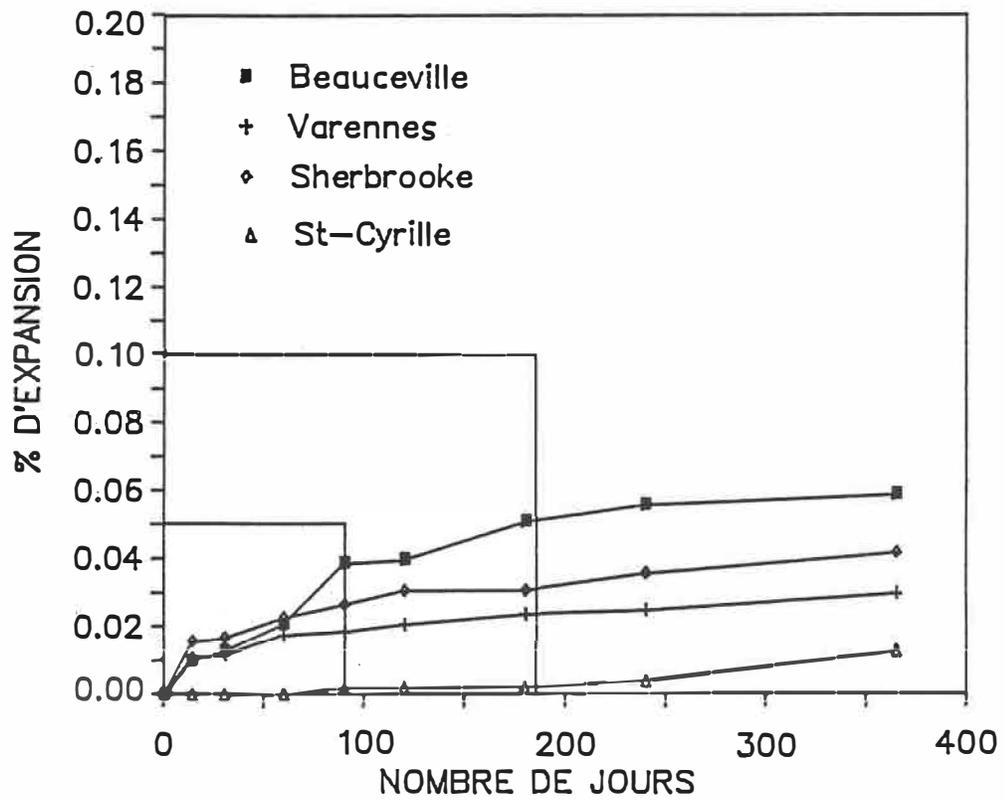


Fig. 51-Résultats des essais ASTM C-227, granulats de Beauceville, Varennes, Sherbrooke et St-Cyrille.

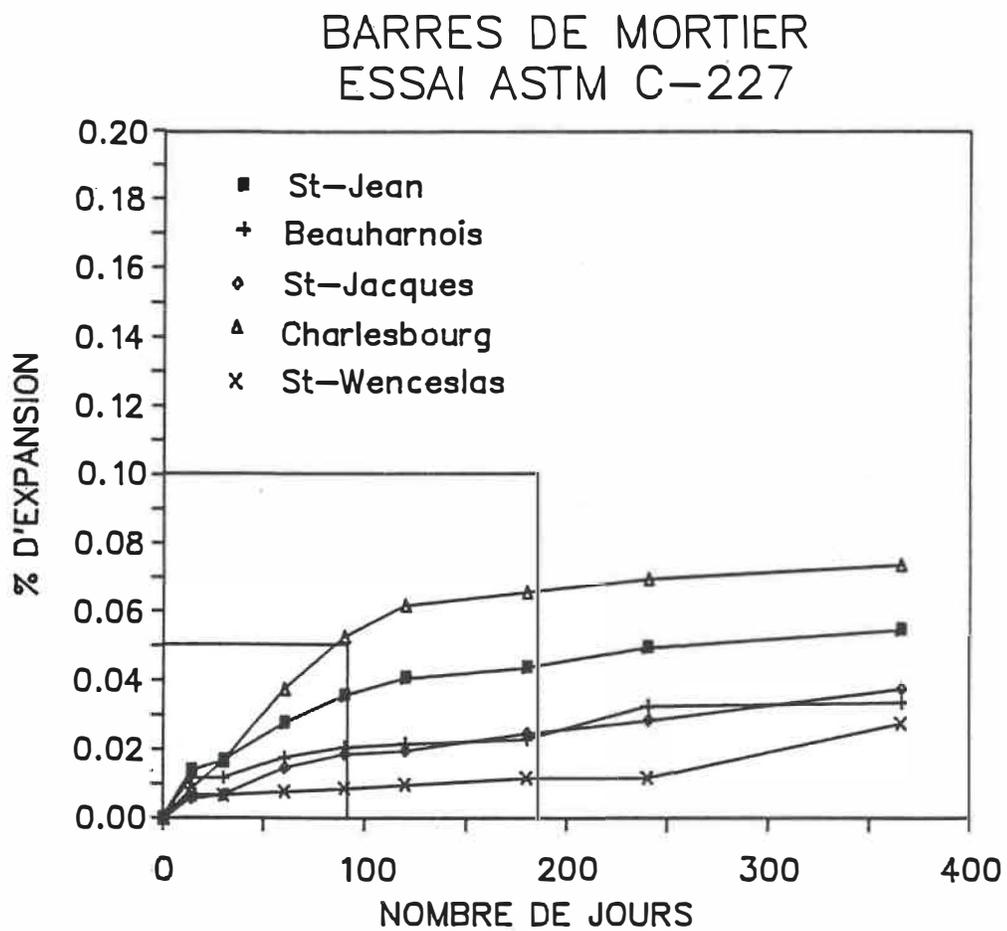


Fig. 52-Résultats des essais ASTM C-227, granulats de St-Jean, Beauharnois, St-Jacques, Charlesbourg et St-Wenceslas.

autour de 0.03-0.04% à un an. Plusieurs granulats reconnus effectivement comme réactifs, ne sont pas détectés par cet essai. C'est le cas du tuf rhyolitique, de l'orthoquartzite, du schiste chloriteux ainsi que des calcaires de St-Jacques, de St-Jean, de Berthier et de Charlesbourg.

VI.1.3: Essais avec prismes de béton (ACNOR A23.2-14A)

Les résultats de ces essais sont présentés aux figures 53 à 56. Après un an de cure, l'allongement des prismes de béton s'échelonne entre 0.001% pour St-Wenceslas et 0.175% pour Trois-Rivières.

En se basant sur ces résultats, dix de nos granulats sont considérés comme étant réactifs, i.e., Ottawa, Côteau-du-Lac, Beauharnois, St-Jean, St-Jacques, Berthier, Sherbrooke, Beauceville et finalement, Charlesbourg. Des sept autres granulats considérés comme étant non-réactifs cinq avaient été classés comme ne démontrant aucun potentiel de réactivité, i.e., Varennes, Laval, St-Hyppolyte, St-Wenceslas et St-Cyrille. Les deux derniers, Hull et Chicoutimi sont considérés comme possédant un faible potentiel de réactivité.

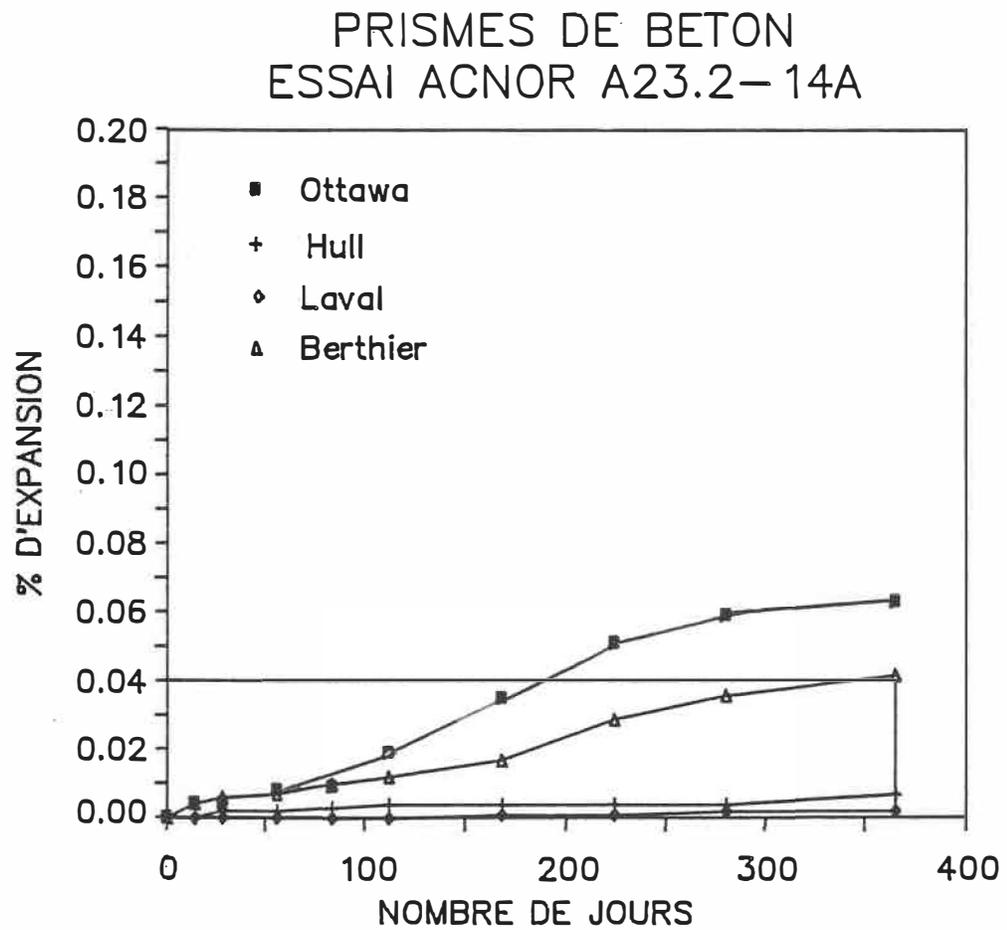


Fig. 53-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A, granulats d'Ottawa, Hull, Laval et Berthier.

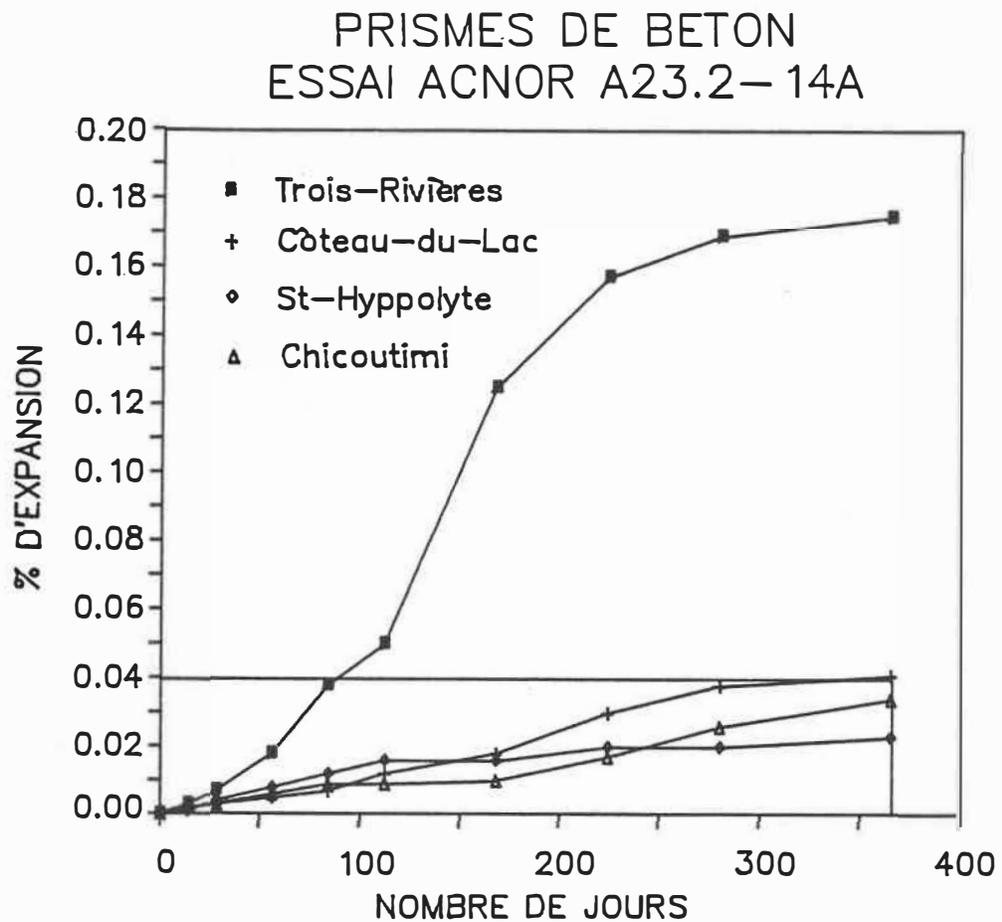


Fig. 54-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A, granulats de Trois-Rivières, Côteau-du-Lac, St-Hyppolyte et Chicoutimi.

PRISMES DE BETON
ESSAI ACNOR A23.2-14A

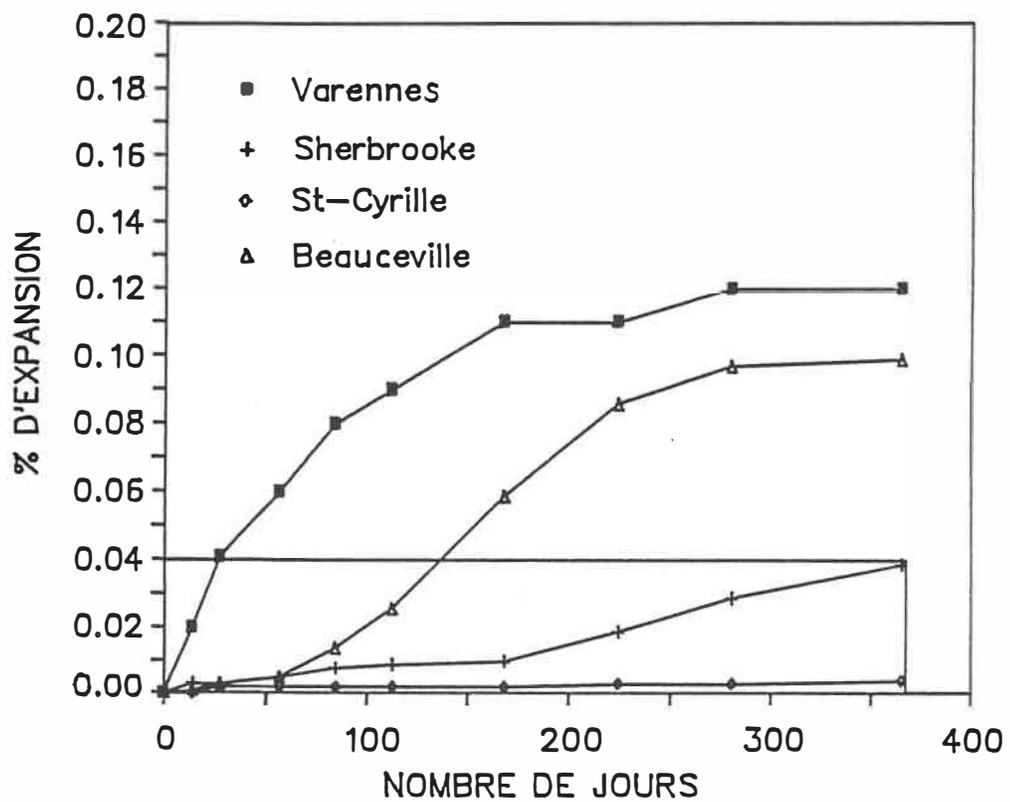


Fig. 55-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A, granulats de Beauceville, Varennes, Sherbrooke et St-Cyrille.

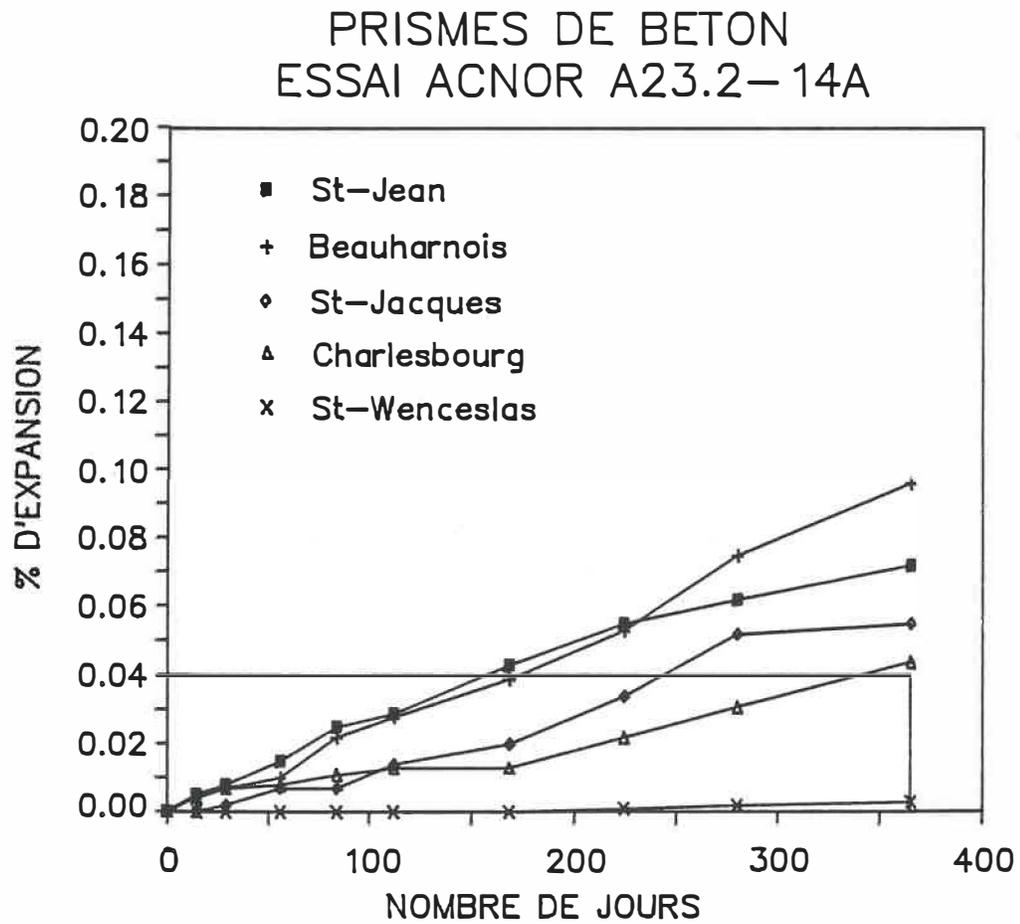


Fig. 56-Résultats des essais ACNOR A23.2-14A, granulats de St-Jean, Beauharnois, St-Jacques, Charlesbourg et St-Wenceslas.

VI.2: Résultats des essais accélérés

VI.2.1: Essai accéléré avec barres de mortier

Les résultats de nos essais accélérés avec barres de mortier sont présentés aux figures 57 à 60. Les résultats s'échelonnent entre 0.008% pour le basalte de St-Cyrille et 0.339% pour le calcaire d'Ottawa. D'après cet essai, en fixant la limite d'expansion permise à 0.10% à douze jours, les dix granulats suivants sont considérés comme étant réactifs: Ottawa, Côteau-du-Lac, St-Jean, St-Jacques, Berthier, Trois-Rivières, Sherbrooke, Beauceville, Charlesbourg et Chicoutimi.

Il est intéressant d'observer le genre de courbes obtenues. En effet, plus la réactivité du granulat est importante, plus la pente de la courbe est accentuée et celle-ci n'atteint pas de plateau comme dans le cas des essais traditionnels. Lors des essais à 38°C, les granulats réactifs atteignent toujours une phase dite "d'expansion tardive" (Grattan-Bellew, 1981b) où la pente est beaucoup plus faible. Dans le cas des essais accélérés, le granulat est toujours en pleine phase de réaction après quatorze jours de cure. Cependant, puisque l'on obtient

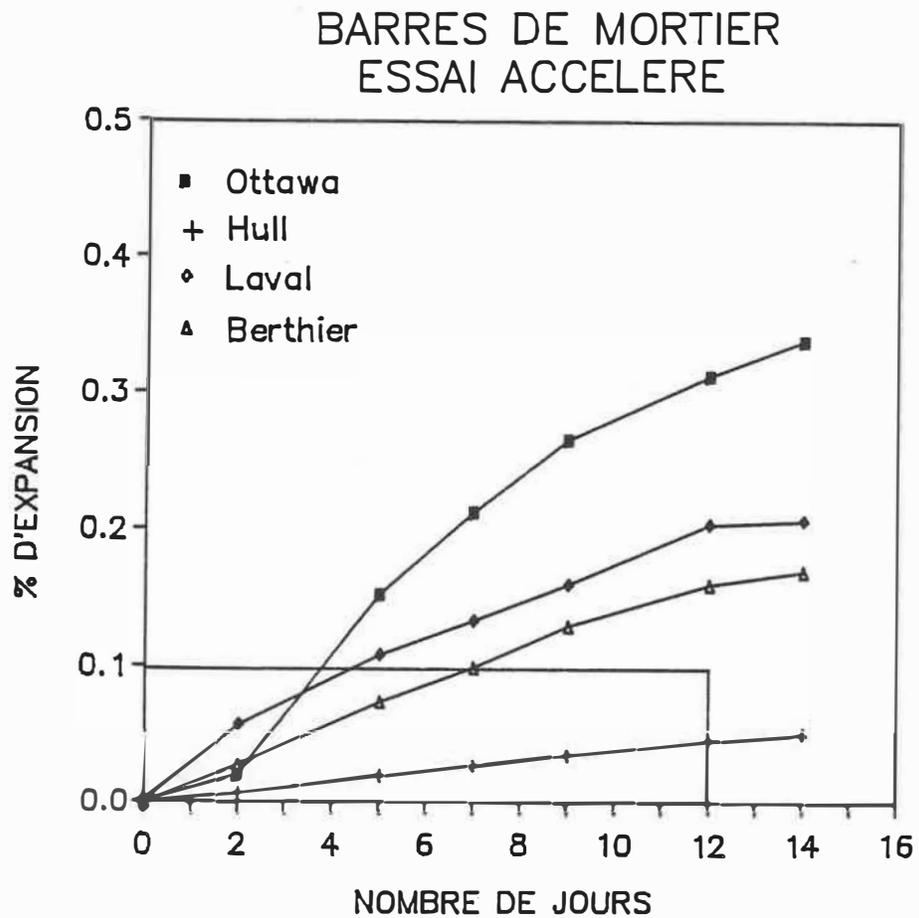


Fig. 57-Résultats des essais accélérés sur barres de mortier, granulats d'Ottawa, Hull, Laval et Berthier.

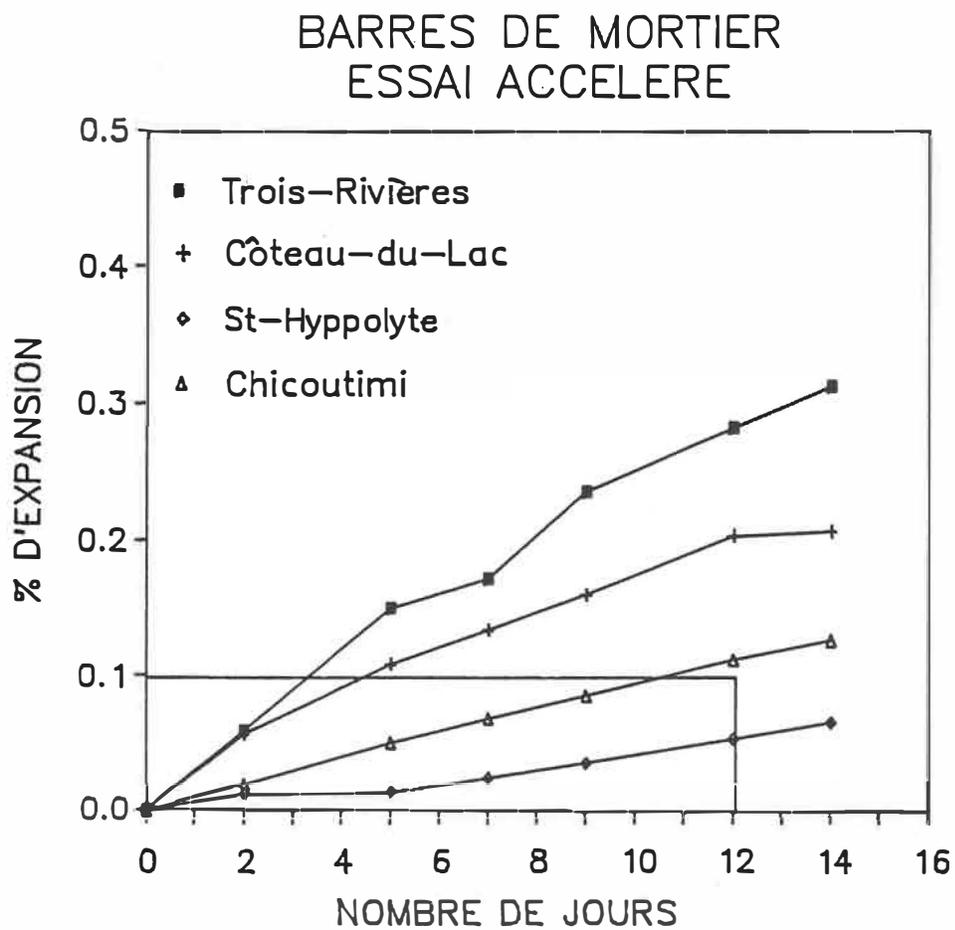


Fig. 58-Résultats des essais accélérés sur barres de mortier, granulats de Trois-Rivières, Côteau-du-Lac, St-Hyppolyte et Chicoutimi.

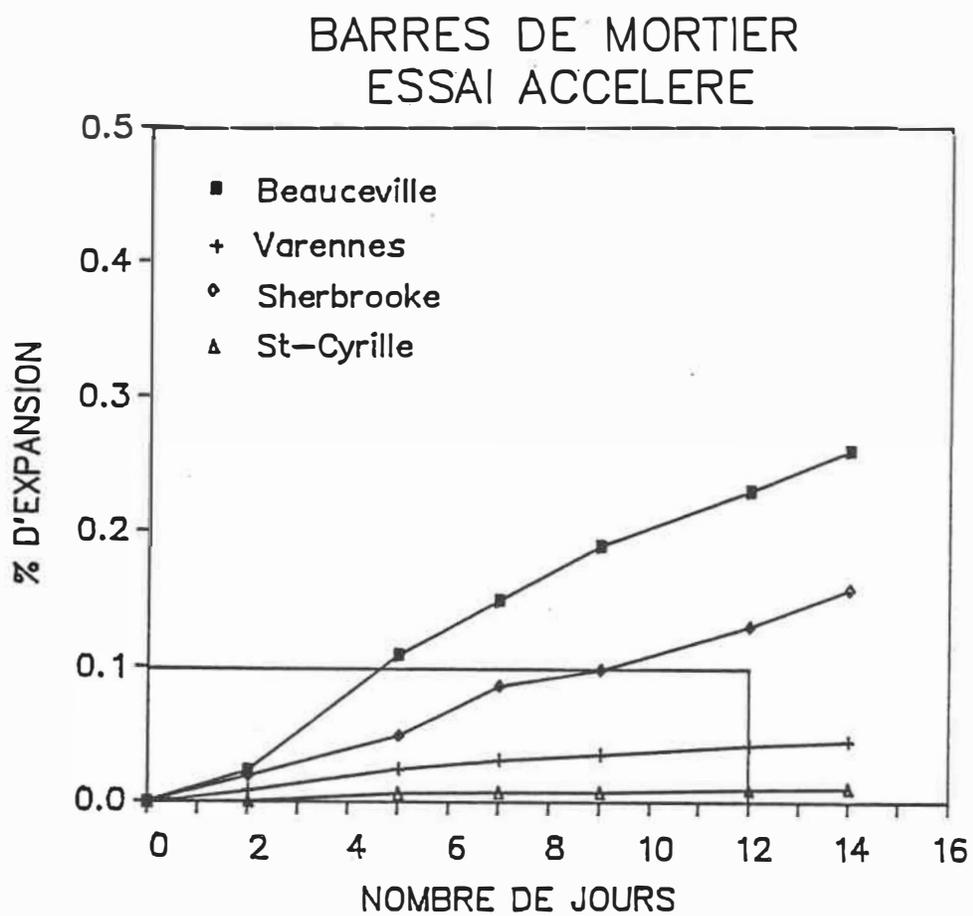


Fig. 59-Résultats des essais accélérés sur barres de mortier, granulats de Beauceville, Varennes, Sherbrooke et St-Cyrille.

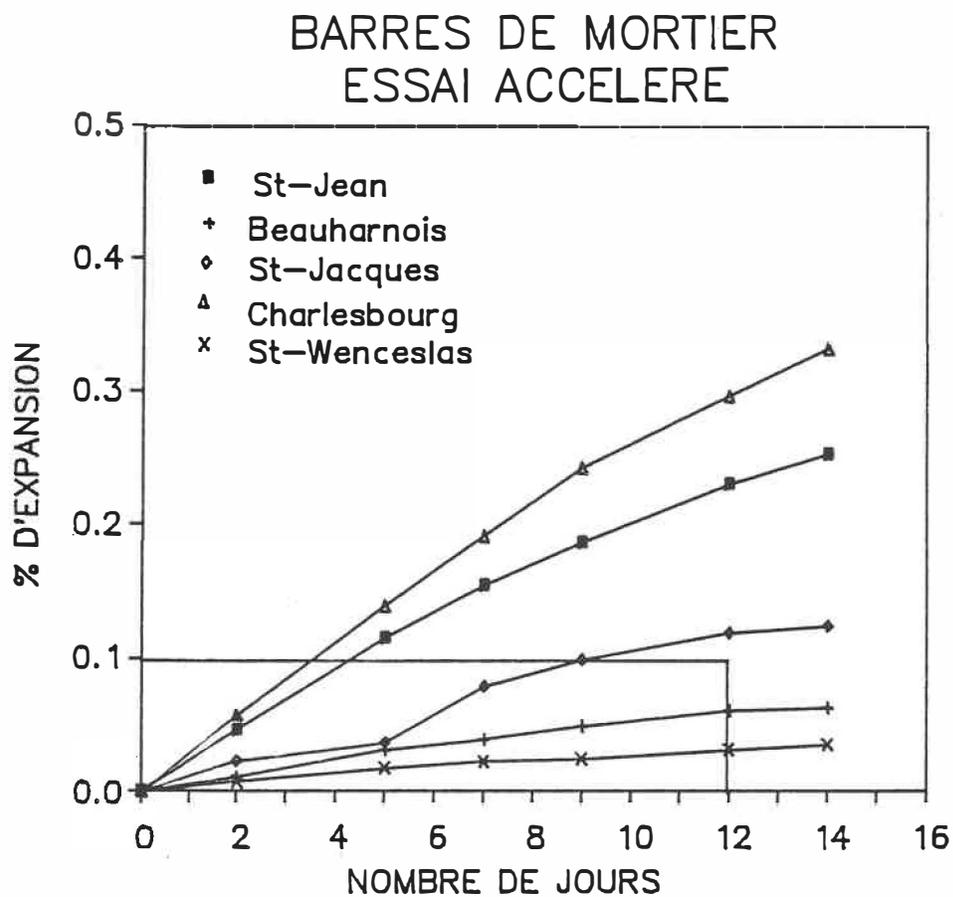


Fig. 60-Résultats des essais accélérés sur barres de mortier, granulats de St-Jean, Beauharnois, St-Jacques, Charlesbourg et St-Wenceslas.

des résultats probants en cette courte période, il ne semble pas utile de poursuivre les mesures plus longtemps.

VI.2.2: Essai accéléré avec prismes de béton.

Les résultats de nos essais accélérés avec prismes de béton sont présentés aux figures 61 à 64. Les résultats varient entre 0.010% pour la métavolcanique de St-Wenceslas et 0.130% pour la dolomie de Coteau-du-Lac, ceci après 24 jours de cure.

Si l'on adopte une limite d'expansion de 0.04% à 24 jours, treize de nos granulats sont alors considérés comme étant réactifs, au lieu de 10 dans le cas des barres de mortier, ce qui fait de cet essai la norme la plus sévère qu'aient subi nos granulats. Les seuls granulats considérés comme non-réactifs proviennent de Varennes, St-Hyppolyte, St-Wenceslas et St-Cyrille. Il est à remarquer que les deux granulats contenant de la dolomie, et qui sont généralement considérés comme non-réactifs, sont ici classés réactifs.

Les courbes obtenues ici rappellent celles obtenues lors des essais accélérés sur barres de mortier. Les

PRISMES DE BETON ESSAI ACCELERE

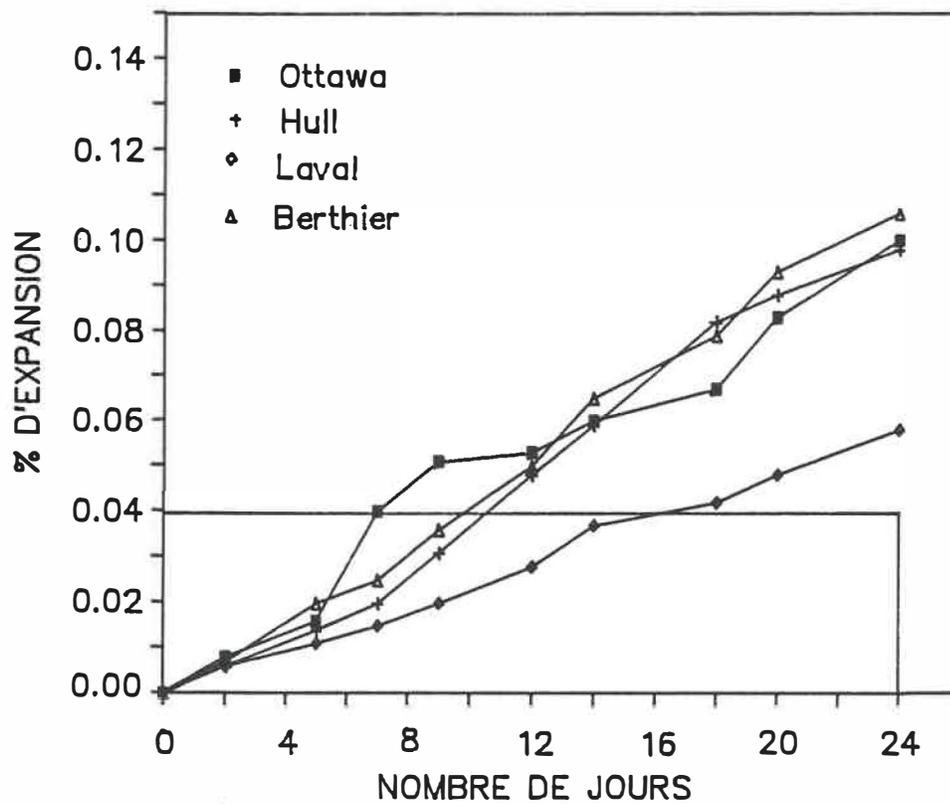


Fig. 61-Résultats des essais accélérés sur prismes de béton, granulats d'Ottawa, Hull, Laval et berthier.

PRISMES DE BETON ESSAI ACCELERE

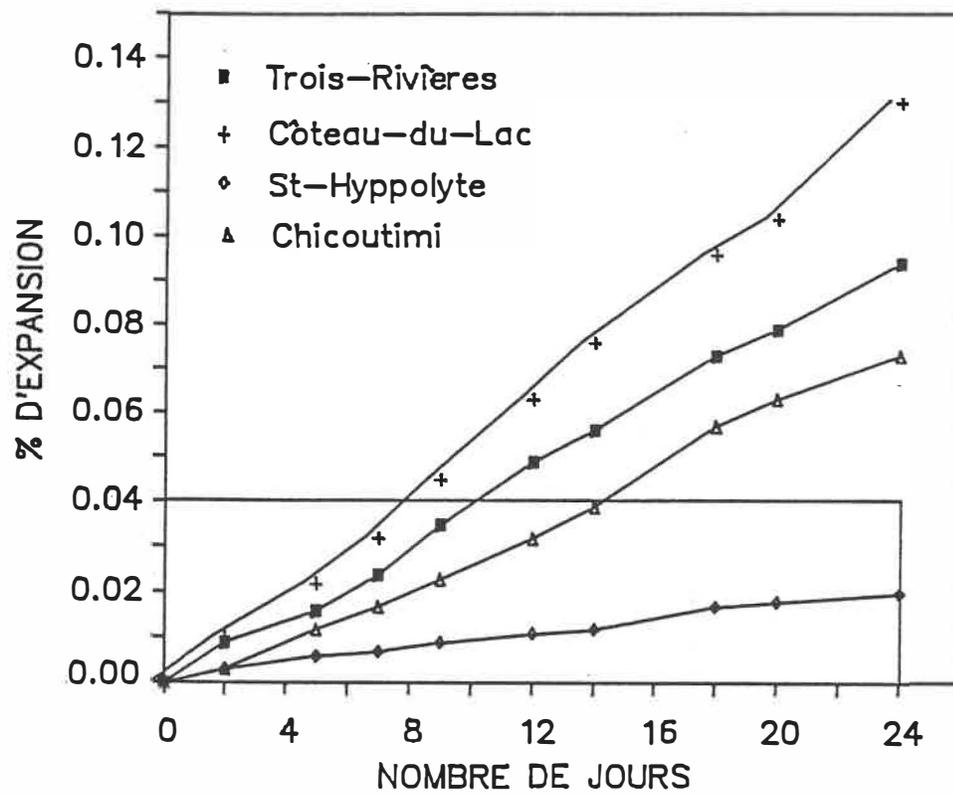


Fig. 62-Résultats des essais accélérés sur prismes de béton, granulats de Trois-Rivières, Côteau-du-Lac, St-Hyppolyte et Chicoutimi.

PRISMES DE BETON ESSAI ACCELERE

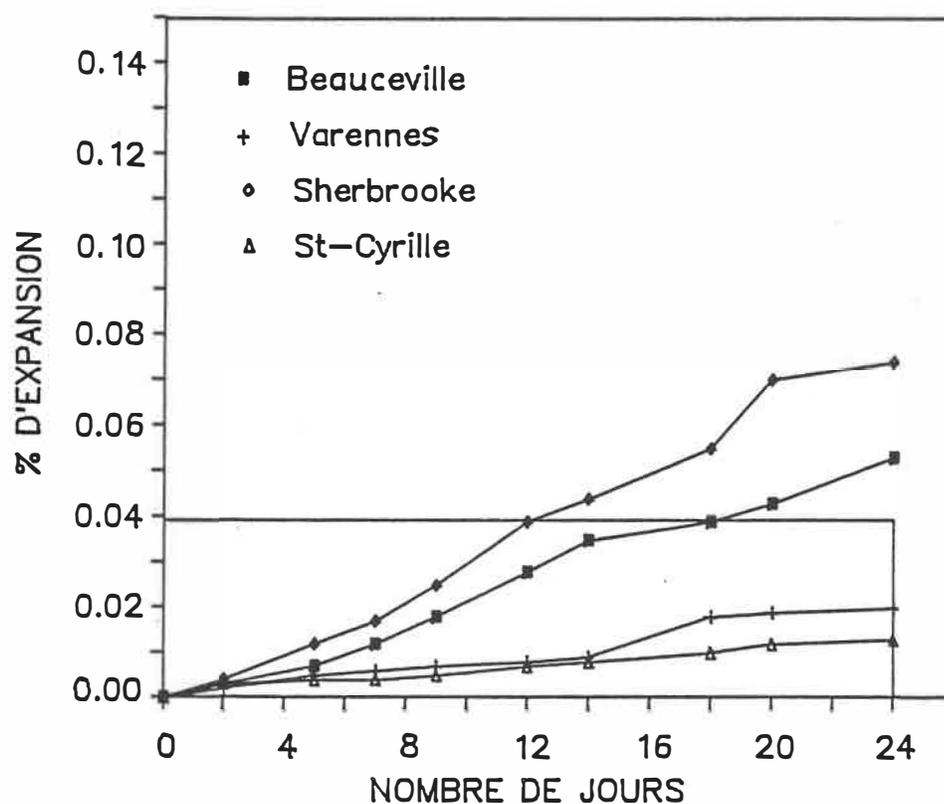


Fig. 63-Résultats des essais accélérés sur prismes de béton, granulats de Beauceville, Varennes Sherbrooke et St-Cyrille.

PRISMES DE BETON ESSAI ACCELERE

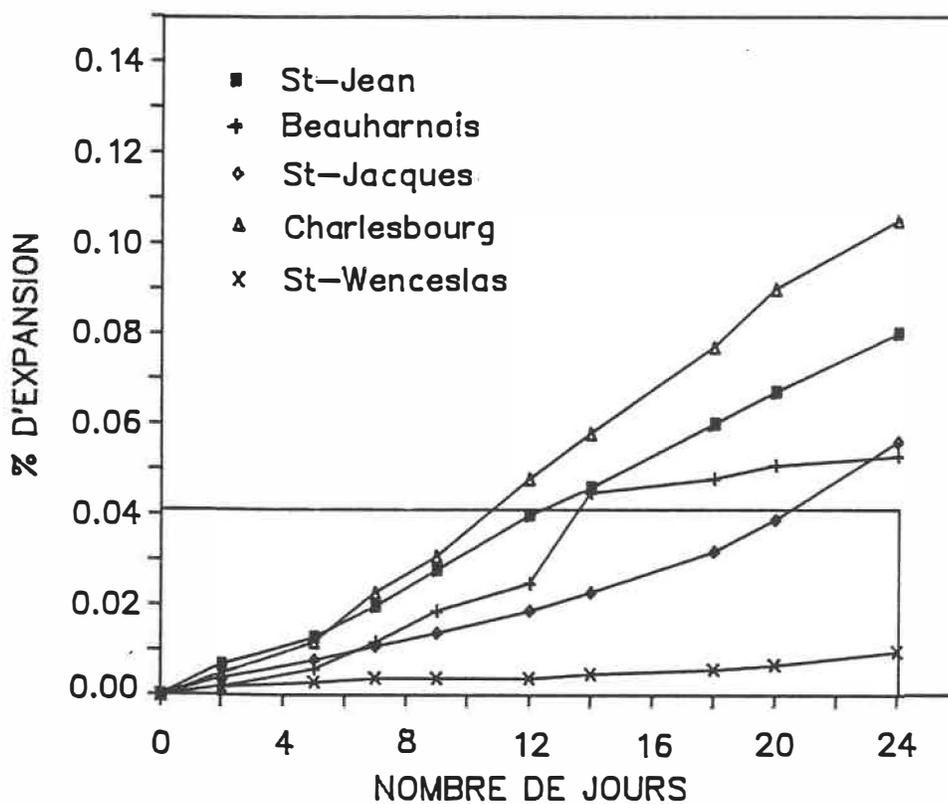


Fig. 64-Résultats des essais accélérés sur prismes de béton, granulats de St-Jean, Beauharnois, St-Jacques, Charlesbourg et St-Wenceslas.

granulats sont en pleine phase de réactivité après, les 24 jours de cure mais, vu les résultats probants, il est inutile de poursuivre l'essai plus longtemps.

VI.3: Cas des dolomies

Les granulats dolomitiques québécois, que ce soit les dolomies du Beekmantown ou les calcaires dolomitiques du Chazy, ne sont pas considérés, jusqu'à preuve du contraire, comme étant réactifs aux alcalis. Ces granulats n'exhibent pas de trace de réaction alcalis-carbonate et encore moins de réaction alcalis-silice.

Cependant, en Ontario, près de Cornwall on a trouvé du gel de silice dans des bétons faits exclusivement avec de la dolomie (J. Bérard, comm. pers.).

Lorsque soumis aux essais accélérés avec prismes de béton aussi bien qu'avec barres de mortier, la dolomie de Coteau-du-Lac a été classée réactive et ceci avec de forts pourcentages d'allongements. A un moindre degré, le calcaire dolomitique de Laval a été classé réactif avec l'essai accéléré sur prismes de béton.

Afin d'éclaircir le comportement des granulats dolomitiques, face aux alcalis à haute-température, une étude fût effectuée à l'aide de mini-prismes tels que ceux utilisés lors de l'essai C-586 de l'ASTM. Ceux-ci furent obtenus à partir de blocs échantillonnés à Côteau-du-Lac et sciés perpendiculairement à la stratification. Neuf cures ont été utilisées afin de bien cerner les facteurs qui influençaient le comportement de ce faciès pétrographique. Le tableau 6 présente les conditions de cure ainsi que les allongements obtenus après un an.

Les résultats obtenus indiquent clairement que seul, les mini-prismes ayant subi une cure dans la soude à haute température ont donné des allongements très importants. Ceux immergées dans la soude à 38⁰C n'ont donné que de faibles allongements. Pour toutes les autres conditions de cure, on a observé aucun allongement.

Les figures 65 à 68 représentent les mini-prismes qui ont subi les différentes cures. On observe sur la figure 65 qu'un mini-prisme ayant subi une cure à 80⁰C dans de l'eau distillée n'exhibe aucun changement. La figure 68 montre un mini-prisme qui a subi la cure à 80⁰C dans une solution de soude 1N. On y observe clairement la fissuration et ultimement la désagrégation de

CURES	EXPANSION*
1. Atmosphère sèche à 23 ⁰ C	0.0 %
2. Atmosphère sèche à 80 ⁰ C	0.0 %
3. Atmosphère humide à 23 ⁰ C	0.0 %
4. Atmosphère humide à 80 ⁰ C	0.0 %
5. Eau distillée à 23 ⁰ C	0.0 %
6. Eau distillée à 80 ⁰ C	0.0 %
7. NaOH 1N à 23 ⁰ C	0.0 %
8. NaOH 1N à 38 ⁰ C	0.3 %
9. NaOH 1N à 80 ⁰ C	>10.0** %

*Expansions mesurées après un an de cure.

*Cette valeur est celle obtenue à trois mois. Après cette date, les échantillons étaient trop fissurés pour que l'essai puisse être poursuivi.

Tableau 6: Essai d'expansion de mini-prismes de dolomie.



Fig. 65-Mini-prismes de dolomie ayant subit différentes cures: de gauche à droite, eau distillée à 80°C, NaOH 1N à 80°C, 1 mois, 2 mois, 3 mois et 4 mois.



Fig. 66-Mini-prisme de dolomie après une cure d'un mois dans de la soude 1N à 80°C.



Fig. 67-Mini-prismes de dolomie après une cure de trois mois dans de la soude 1N à 80°C.



Fig. 68-Mini-prisme de dolomie après un séjour de quatre mois dans de la soude 1N à 80°C.

l'échantillon.

Notre hypothèse de départ était que les dolomies subissaient une expansion thermique à haute-température, ce qui causait les expansions lors des essais accélérés. Ce comportement de certaines dolomies a été expliqué par Soles en 1987. Nos résultats indiquent que l'expansion de certaines dolomies n'apparaît à haute température qu'en présence d'alcalis.

On assisterait donc ici à une dédolomitisation rendant la roche plus poreuse, permettant ainsi aux solutions de rejoindre les minéraux argileux qui étaient jusque là dans un état sec. L'hydratation de ces argiles serait donc ici la cause des expansions mesurées.

Nous n'avons pas, dans le cadre de ce projet de recherche, poussé plus loin l'étude du comportement des dolomies à haute température en présence d'alcalis. Les seules autres données que nous possédons sur la question proviennent d'une dolomie de la région de Toronto que nous avons soumis aux essais accélérés avec barres de mortier. Celle-ci est très pure avec un pourcentage de minéraux argileux de 2% et est reconnue comme étant non-réactive aux alcalis. On obtient de faibles allongements de 0.027%

ce qui classe le granulats comme étant non-réactif. Ceci viendrait confirmer le rôle important que les minéraux argileux jouent dans les expansions obtenues à haute-température.

Finalement, il faut observer que l'essai A23.2-14A avec prismes de béton, effectué sur les dolomies de Coteau-du-Lac, nous a donné 0.041% d'expansion après un an de cure à 38⁰C, ce qui le place en deça de la limite permise. Il semble que la température relativement élevée soit la cause de l'expansion. Les mini-prismes dans une solution de soude à 38⁰C ont donné un résultat semblable alors que nous obtenions 0.3% d'allongement après un an de cure.

VI.4: Les produits de réaction

Un des moyens les plus simples afin de diagnostiquer une réaction alcalis-silice est d'observer la présence de gel calco-alcalin-siliceux caractéristique de cette réaction. Durand et Bérard (1987) ont démontré que la composition chimique de ce produit de réaction pouvait servir de critère d'identification de la réaction

alcalis-silice. Les gels produits sont riches en Ca et Si et en moindre importance en Na et en K.

Dans le but de vérifier que les essais accélérés reproduisent bien une réaction alcalis-silice, nous avons déterminé la composition chimique des gels produits. Pour ce faire, nous avons utilisé un microscope électronique à balayage JEOL JSM-820 équipé d'un spectromètre à dispersion d'énergie au silicium dopé au lithium TRACOR X-RAY dont la limite de détection est le sodium. Le détecteur est relié à un ordinateur TRACOR NORTHERN TN 2000.

Nous avons analysé les gels trouvés sur des échantillons de mortier provenant d'une même gâchée et dont la moitié a subi une cure selon la norme ASTM C-227 durant un an, et l'autre moitié a subi un essai accéléré durant quatorze jours. Le granulats utilisé pour cette étude est le calcaire d'Ottawa reconnu pour sa grande réactivité.

Les échantillons ont été asséchés au préalable dans une étuve à 60°C et recouverts d'une mince couche de carbone à l'aide d'un évaporateur à électrodes de carbone. Nous avons photographié les produits de réaction et

effectué une analyse par fluorescence-X.

Les figures 69 à 74 présentent les résultats obtenus avec des échantillons ayant subi la cure de l'essai accéléré tandis que les figures 75 à 80 présentent les résultats obtenus avec les échantillons qui ont été soumis aux essais traditionnels.

Dans les deux cas les gels présentent une morphologie et une composition chimique identiques.

Ceci confirmerait le fait que les essais accélérés à 80°C ne feraient que catalyser la réaction alcalis-granulat sans qu'aucun autre phénomène n'interfère dans le processus de réaction. Davies et Oberholster (1988) en sont arrivés aux mêmes conclusions lors d'une étude exhaustive des produits de réaction trouvés lors de leurs essais accélérés.



Fig. 69-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai accéléré avec le calcaire d'Ottawa. (190X)

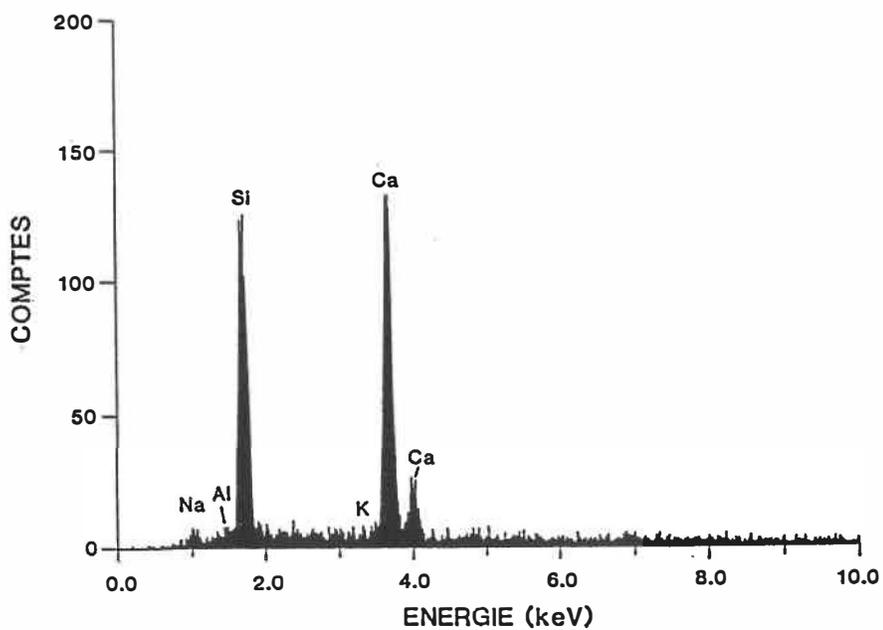


Fig. 70-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de gel présenté à la figure 69.



Fig. 71-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai accéléré avec le calcaire d'Ottawa. (230X).

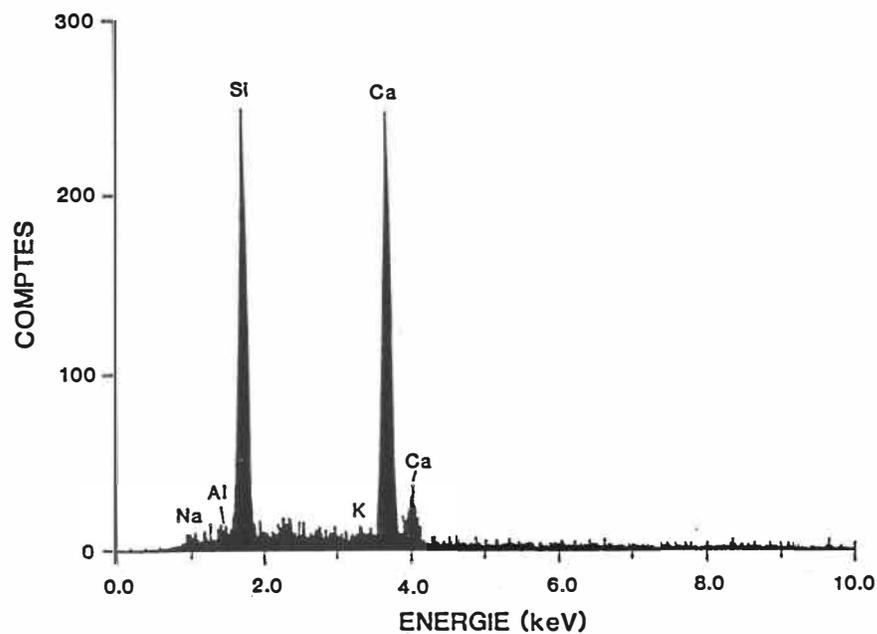


Fig. 72-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 71.

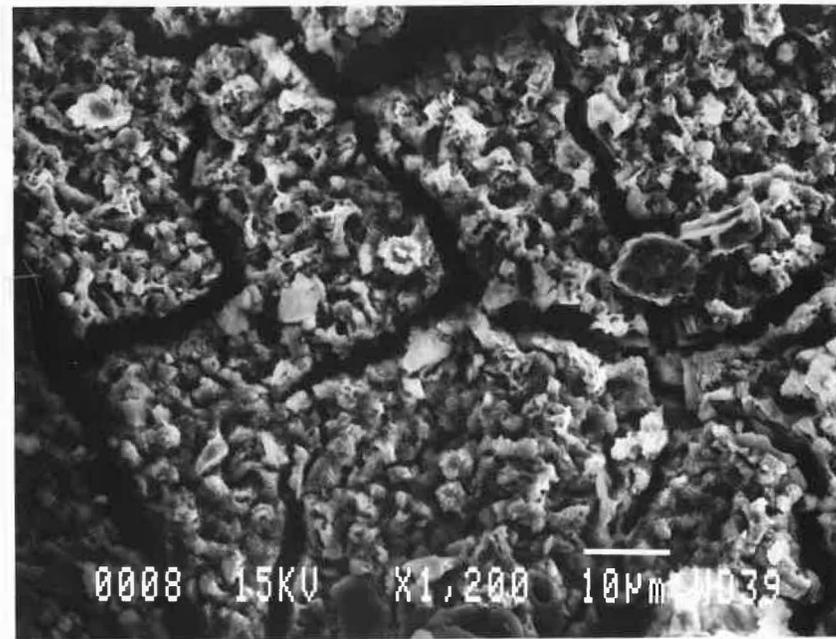


Fig. 73-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai accéléré avec le calcaire d'Ottawa. (1200X)

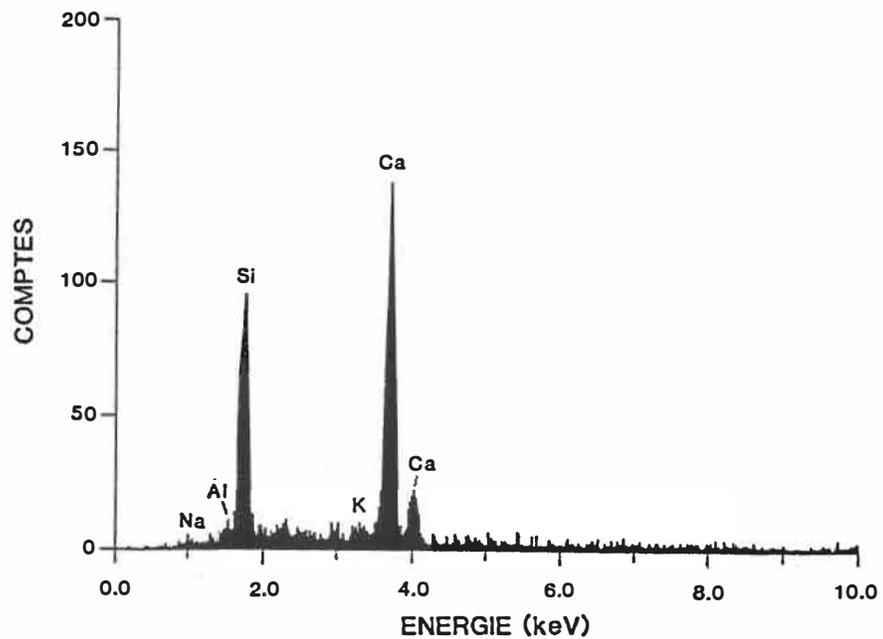


Fig. 74-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 73. (90X)

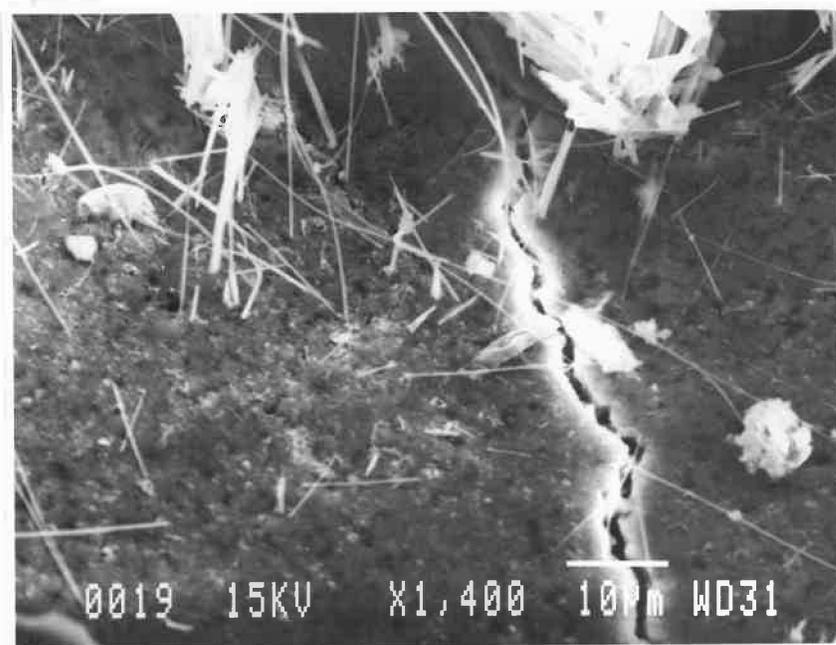


Fig. 75-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai ASRTM C-227 avec le calcaire d'Ottawa. (1400X)

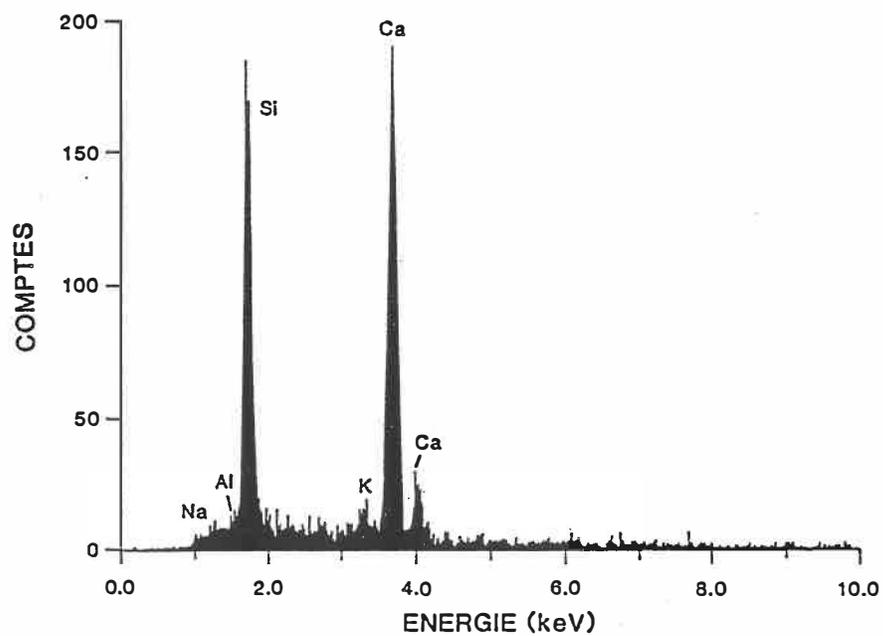


Fig. 76-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 75.

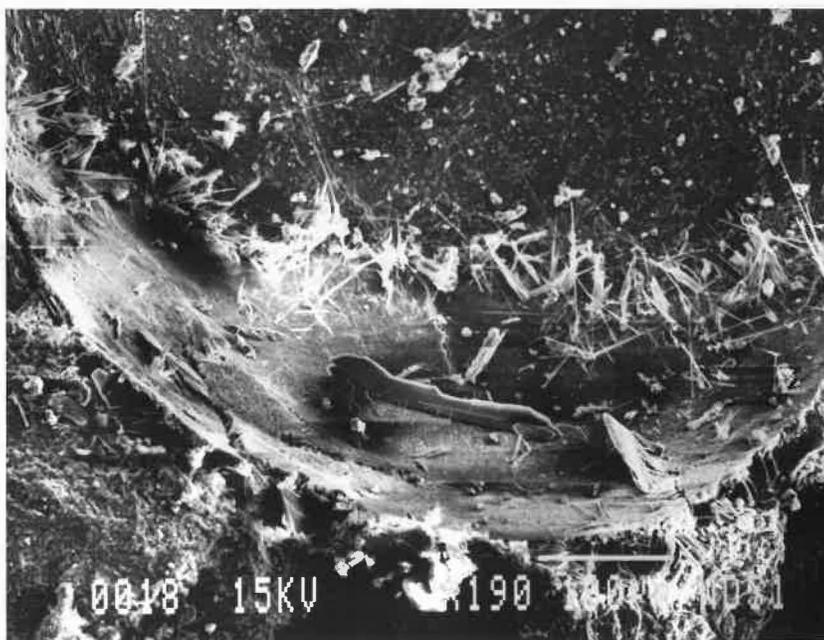


Fig. 77-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alkalin-siliceux produit lors de l'essai ASTM C-227 avec le calcaire d'Ottawa. (190X)

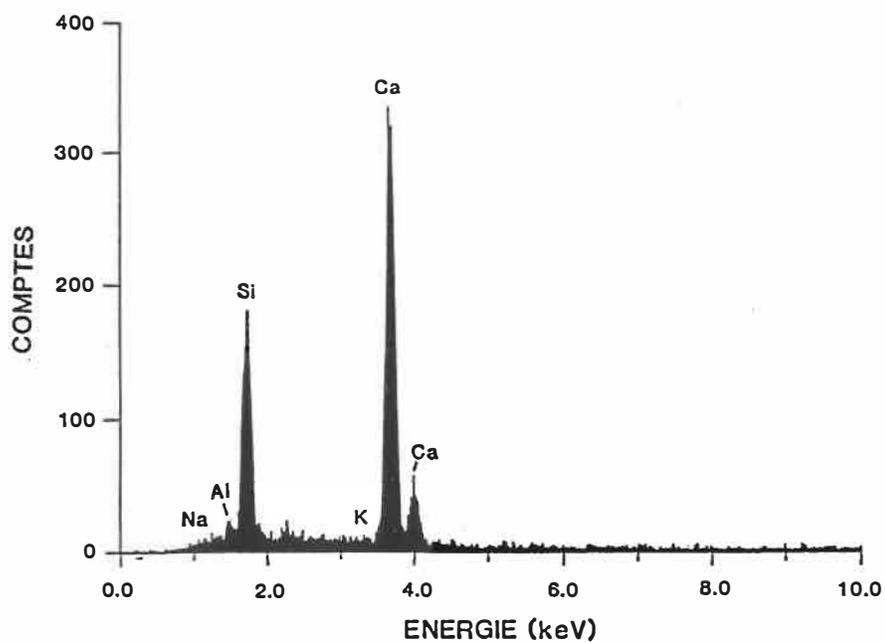


Fig. 78-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 77.



Fig. 79-Photographie prise au MEB montrant un gel calco-alcalin-siliceux produit lors de l'essai ASTM C-227 avec le calcaire d'Ottawa. (250X)

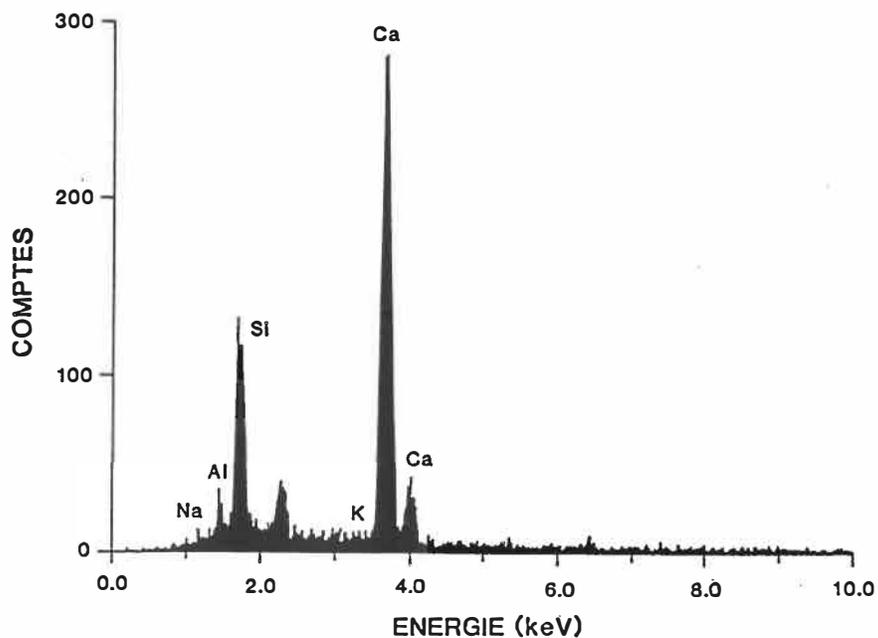


Fig. 80-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 79.

CHAPITRE VII

DISCUSSION

VII.1: Relation entre les essais

Le tableau 7 présente la réactivité de nos granulats.

Pour chacun des granulats, nous avons effectué une estimation de la réactivité basée sur l'expérience acquise par histoire de cas ainsi que sur l'analyse pétrographique. Cette estimation se traduit par une cote variant entre 1 et 3. Une cote de 1 classe le granulat comme étant réactif, de 2 comme étant potentiellement réactif et de 3 comme étant non-réactif.

La cote de 1 est ici attribuée lorsque la réactivité du granulat a été observée dans de nombreuses structures de béton où il a été utilisé. La réactivité observée peut être assez importante pour justifier des réparations et même, dans les cas les plus graves, la reconstruction de la structure.

SITES	LIEU	FACIES PETROGRAPHIQUE	REACTIVITE*
1	Ottawa	calcaire	1
2	Hull	calcaire	2
3	Côteau-du-Lac	dolomie	2
4	Beauharnois	orthoquartzite	1
5	St-Jean	calcaire	1
6	Varenes	syénite	3
7	Laval	calcaire dolomitique	3
8	St-Hypolitte	gneiss oeilé	2
9	St-Jacques	calcaire	1
10	Berthier	calcaire	1
11	Trois-Rivières	calcaire	1
12	St-Wenceslas	métavolcanique	2
13	St-Cyrille	basalte	3
14	Sherbrooke	schiste à chlorite	1
15	St-Georges	tuf rhyolitique	1
16	Charlesbourg	mudstone calcareux	1
17	Chicoutimi	calcaire	2

REACTIVITE: 1 granulat réactif
 2 granulat contenant des phases
 potentiellement réactives
 3 granulat non-réactif

TABLEAU 7: Réactivité des granulats

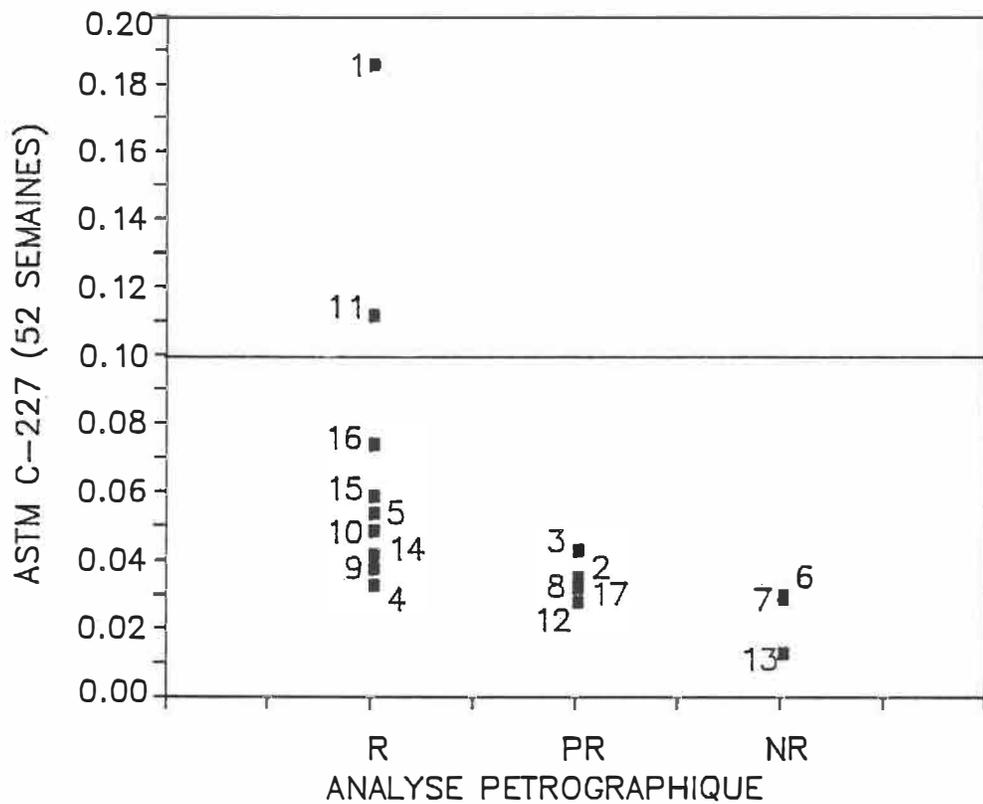
La cote de 2 a été attribuée lorsque seules les structures exposées à des conditions sévères d'exposition exhiberont des signes de réactivité. Les structures demeurent viables la plupart du temps et ne demanderont que des réparations mineures. Ce genre de granulat peut être acceptable, dans de nombreuses situations, dépendant du type de structures et du genre d'environnement auxquelles elles auront à faire face.

Finalement, la cote de 3 est attribuée lorsque les structures ne démontrent aucun signes de réactivité, et ceci, indépendamment du type d'exposition.

Dans le but de vérifier les relations existantes entre les résultats des différents essais, et l'évaluation pétrographique des granulats, nous avons rapporté ces résultats sur graphiques.

Le graphique de la figure 81 exprime la relation entre l'essai ASTM C-227 et l'analyse pétrographique. On y observe que des neuf granulats reconnus réactifs, seulement deux ont été détectés par cette essai: le calcaire d'Ottawa et celui de Trois-Rivières. Rappelons que ces deux granulats sont reconnus pour leur grande réactivité. Tous les autres granulats reconnus comme étant

ASTM C-227 vs ANA. PETRO. RELATION



R: REACTIF, PR: POTENTIELLEMENT REACTIF, NR: NON REACTIF

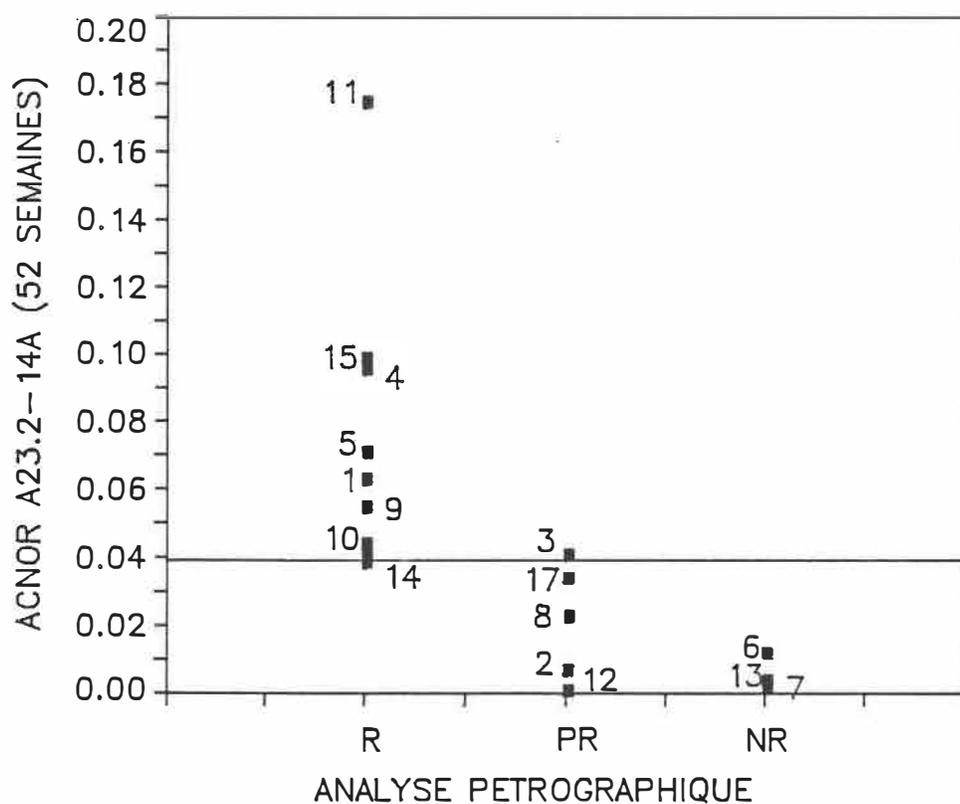
Fig. 81-Relation entre les résultats de l'essai ASTM C-227 et l'analyse pétrographique.

réactifs passent cet essai avec beaucoup de facilité, et ceci même après plus d'un an de cure au lieu des six mois suggérés par la norme.

Le graphique de la figure 82 met en relation l'essai A23.2-14A de l'ACNOR avec l'analyse pétrographique. Les neuf granulats réactifs ont été détectés par l'essai. Des cinq granulats potentiellement réactifs, seule la dolomie de Côteau-du-Lac est classée comme étant réactive. Les trois granulats non-réactifs sont considérés comme tel par l'essai.

Le graphique de la figure 83 met en relation l'essai accéléré avec barres de mortier et l'analyse pétrographique. Des neuf granulats réactifs, huit ont été détectés. Le granulat réactif qui n'a pas été détecté est l'orthoquartzite de Beauharnois. Ceci s'explique du fait que la composante réactive de ce granulat, le ciment siliceux, est perdu en grande partie lors du concassage du granulat. Il faut donc insister ici sur le fait que l'essai n'est pas en cause mais plutôt la structure du granulat. Ceci est un bel exemple qu'il ne faut pas s'arrêter aux résultats d'un essai avant d'avoir analysé tous les facteurs en présence. Des cinq granulats potentiellement réactifs, deux sont classés réactifs, la

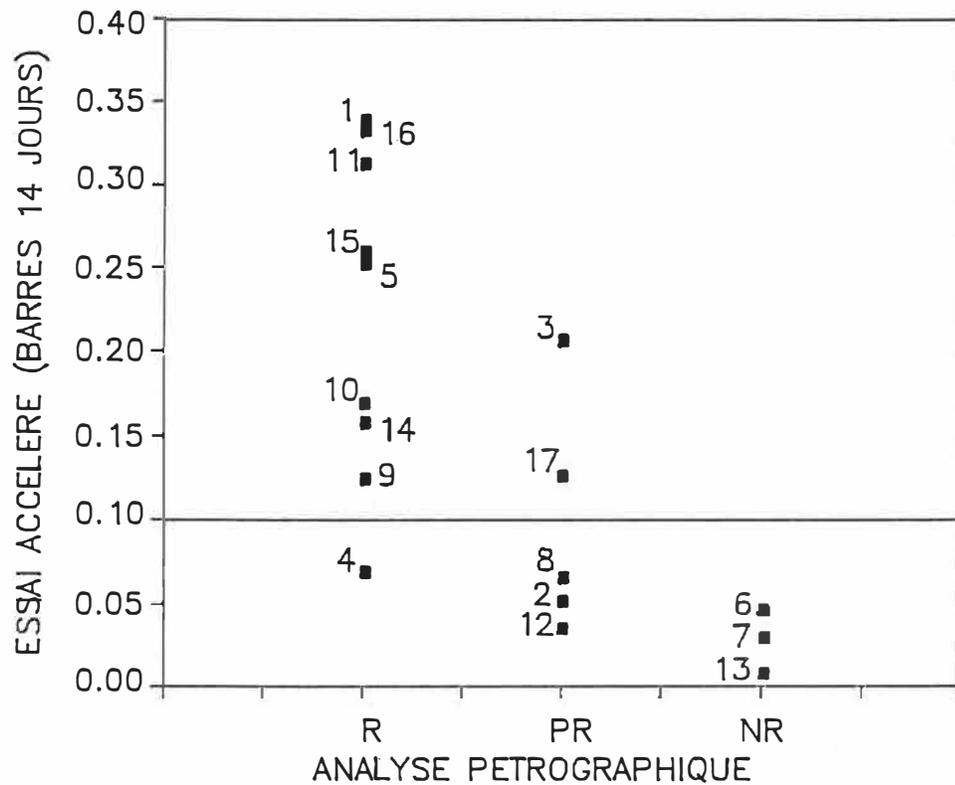
ACNOR A23.2-14A vs ANA. PETRO. RELATION



R: REACTIF, PR: POTENTIELLEMENT REACTIF, NR: NON REACTIF

Fig. 82-Relation entre les résultats de l'essai ACNOR A23.2-14A et l'analyse pétrographique.

BARRES A 80 vs ANA. PETRO. RELATION



R: REACTIF, PR: POTENTIELLEMENT REACTIF, NR: NON REACTIF

Fig. 83-Relation entre les résultats de l'essai accéléré sur barres de mortier et l'analyse pétrographique.

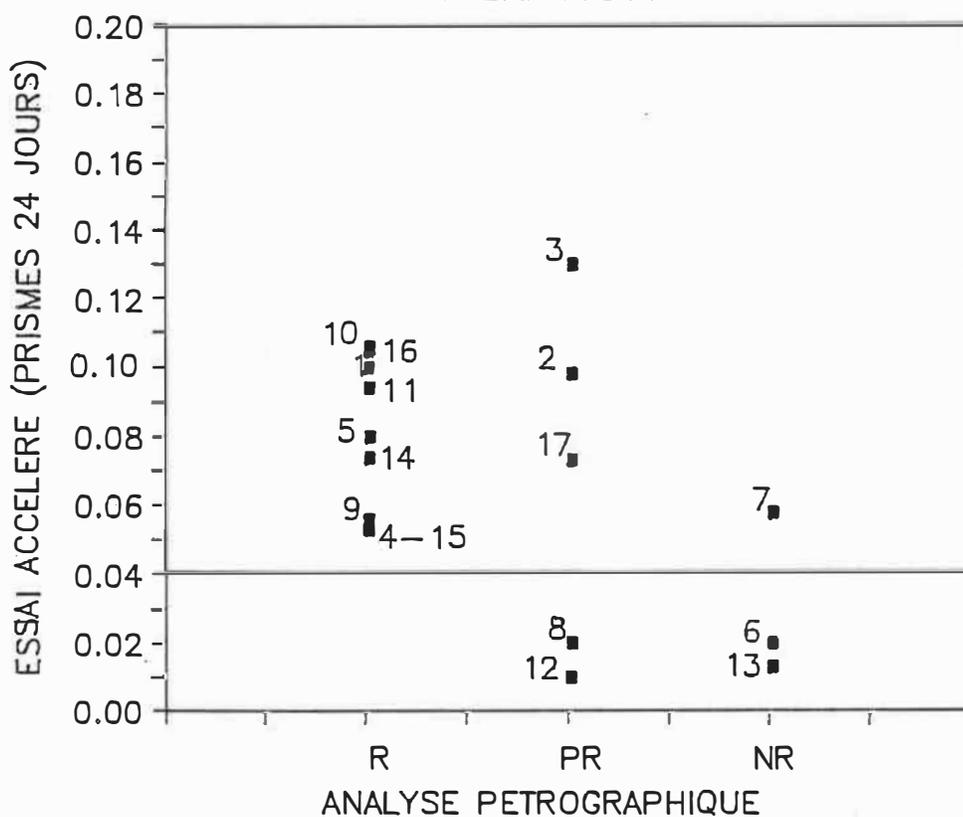
dolomie de Côteau-du-Lac et le calcaire de Chicoutimi.

Le graphique 84 exprime la relation entre l'essai accéléré avec prismes de béton et l'analyse pétrographique. Les 9 granulats réactifs ont été facilement détectés par l'essai. Dans le cas des granulats potentiellement réactifs trois sont classés réactifs, la dolomie de Côteau-du-Lac, le calcaire de Hull et celui de Chicoutimi. Signalons que le calcaire dolomitique de Laval est classé réactif par l'essai.

Nous avons par la suite mis en relation les résultats des essais pris deux par deux dans le but de vérifier si les deux essais classaient les granulats de façon identique.

<u>ESSAIS</u>		<u>FIGURE</u>	<u>CLASSEMENTS</u>
			<u>DIVERGENTS</u>
1.	ASTM C-227 vs barres à 80°C	85	47 %
2.	ASTM C-227 vs prismes à 80°	86	65 %
3.	A23.2-14A vs barres à 80°C	87	6 %
4.	A23.2-14A vs prismes à 80°	88	18 %
5.	ASTM C-227 vs A23.2-14A	89	41 %
6.	barres à 80°C vs prismes à 80°C	90	18 %

PRISMES A 80 vs ANA. PETRO.
RELATION



R: REACTIF, PR: POTENTIELLEMENT REACTIF, NR: NON REACTIF

Fig. 84-Relation entre les résultats de l'essai accéléré sur prismes de béton et l'analyse pétrographique.

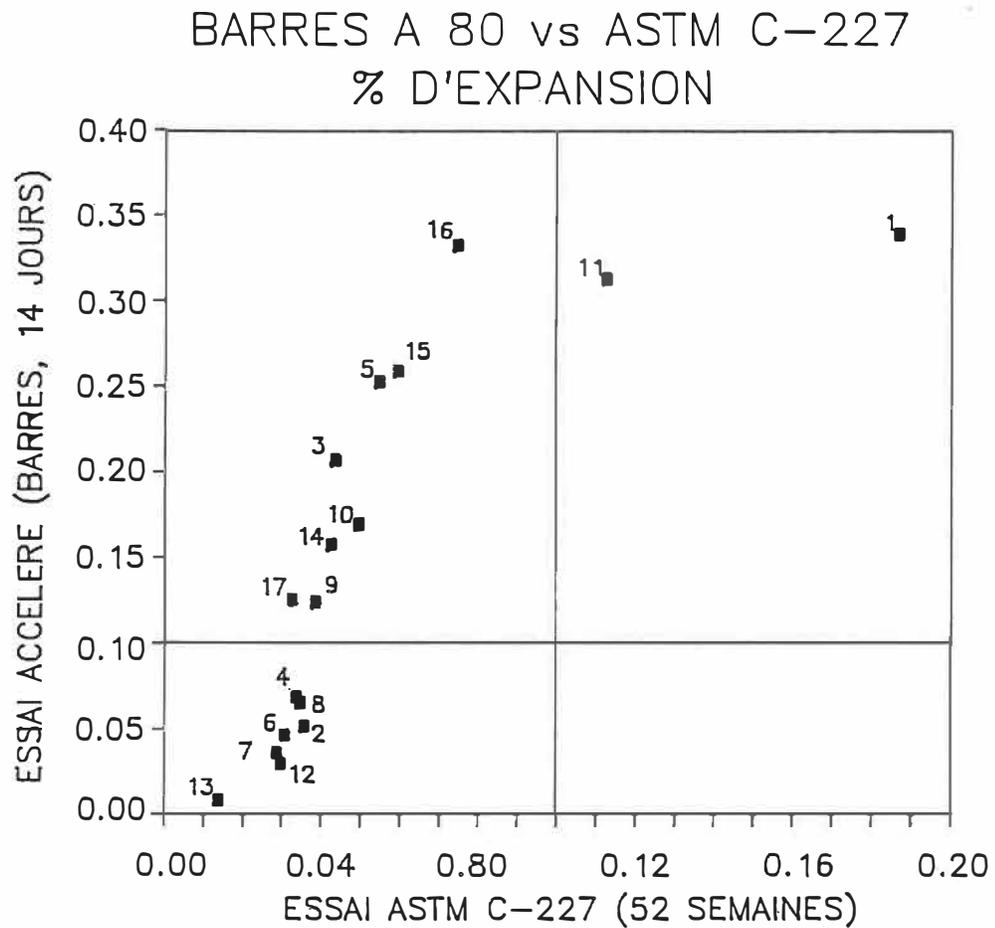


Fig. 85-Relation entre l'essai accéléré sur barres de mortier et l'essai ASTM C-227.

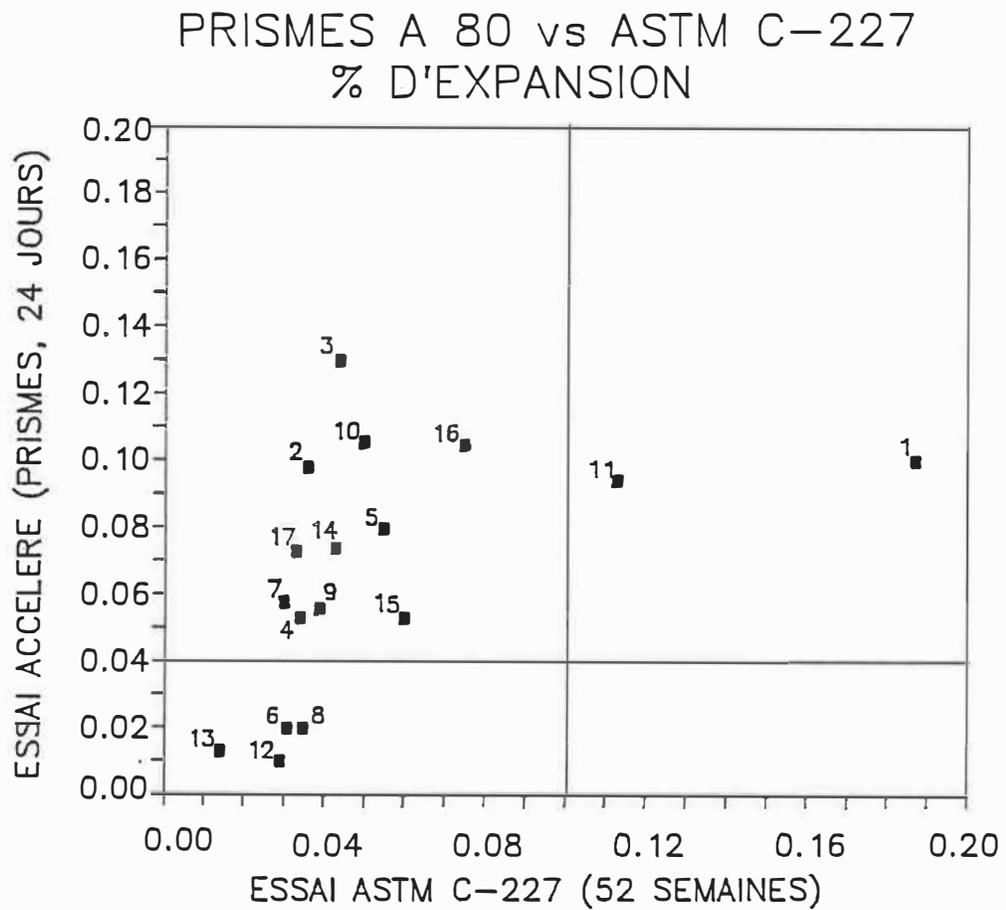


Fig. 86-Relation entre l'essai accéléré sur prismes de béton et l'essai ASTM C-227.

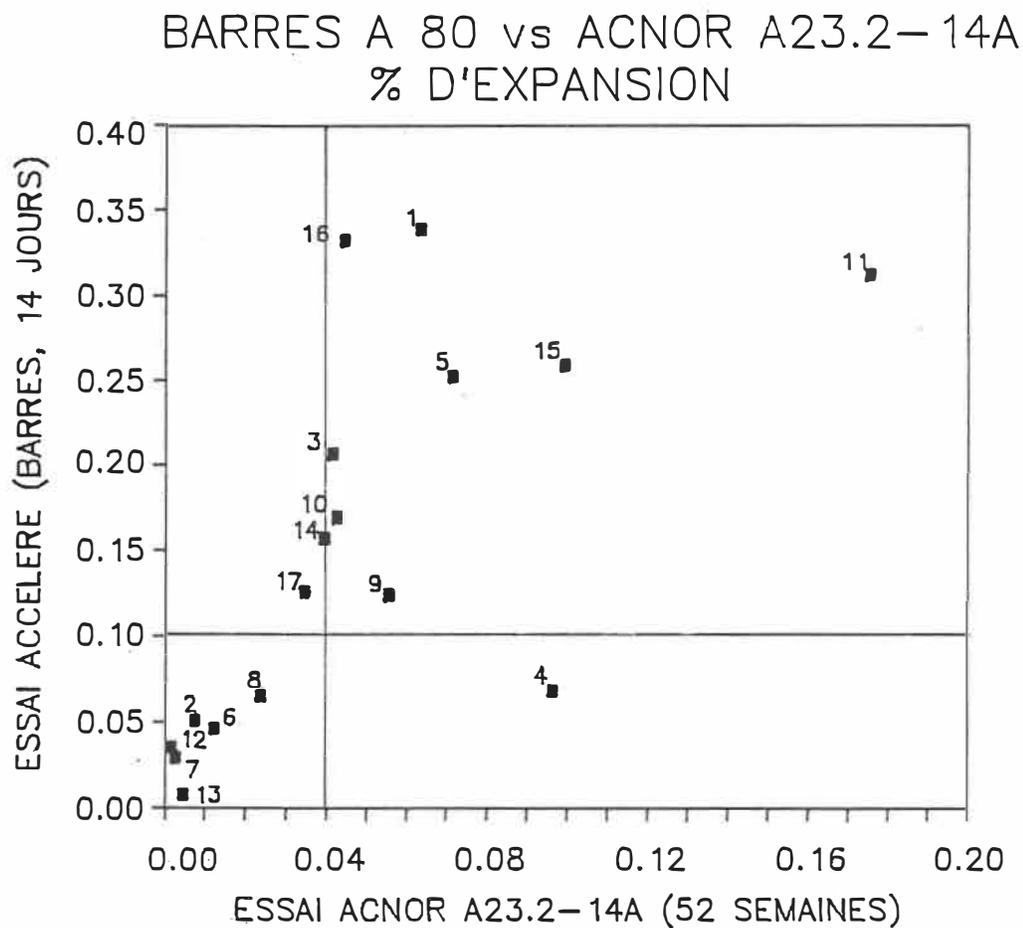


Fig. 87-Relation entre l'essai accéléré sur barres de mortier et l'essai ACNOR A23.2-14A.

PRISMES A 80 vs ACNOR A23.2-14A
% D'EXPANSION

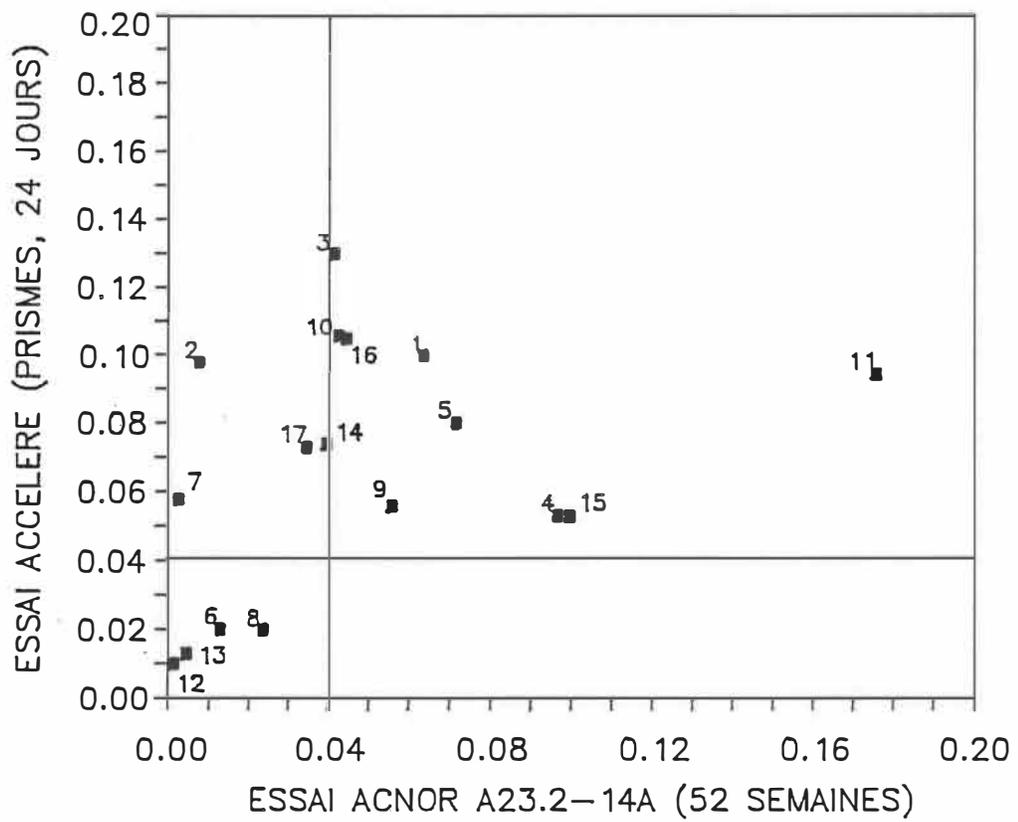


Fig. 88-Relation entre l'essai accéléré sur prismes de béton et l'essai ACNOR A23.2-14A.

ACNOR A23.2-14A vs ASTM C-227
% D'EXPANSION

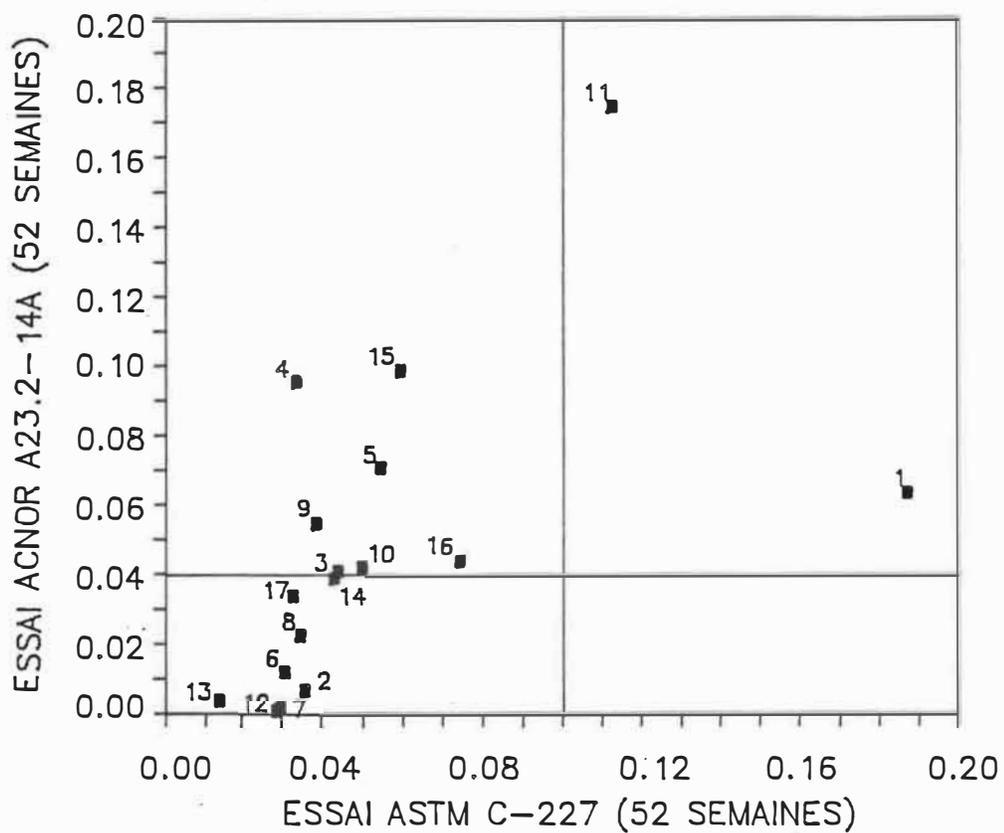


Fig. 89-Relation entre l'essai ACNOR A23.2-14A et l'essai ASTM C-227.

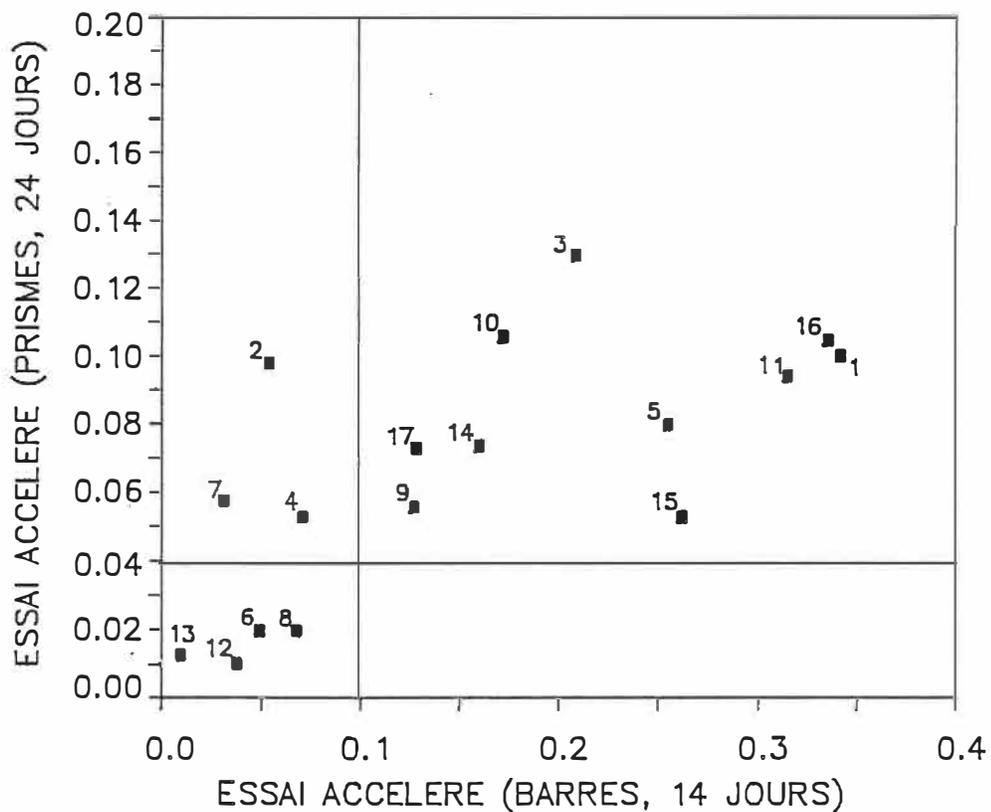
PRISMES A 80 vs BARRES A 80
% D'EXPANSION

Fig. 90-Relation entre l'essai accéléré sur prismes de béton et l'essai accéléré sur barres de mortier.

On obtient beaucoup de classements divergents lorsque l'essai ASTM C-227 est impliqué, 51 pourcent en moyenne. La meilleure relation fut obtenue entre l'essai A23.2-14A et l'essai accéléré avec barres de mortier où la seule divergence fut obtenue avec l'orthoquartzite pour les raisons déjà mentionnées. Les relations entre l'essai accéléré avec prismes de béton et l'essai A23.2-14A et l'essai accéléré avec barres de mortier sont aussi très bonnes mais le comportement des granulats dolomitiques à haute température vient masquer un peu ces résultats.

CHAPITRE VIII

CONCLUSION

VIII.1: Situation actuelle

Il existe un besoin pressant de développer un essai rapide et fiable pour détecter le potentiel de réactivité aux alcalis des granulats à béton.

Pour les prochains travaux majeurs (réseau routier, réseau hydro-électrique) il ne faudrait pas refaire les mêmes erreurs que par le passé. Notre climat difficile ne pardonne pas facilement ce genre d'erreur. On n'a qu'à observer certaines structures affectées pour se rendre compte de la gravité de la situation. L'espérance de vie de plusieurs structures est écourtée de façon draconienne affectant ainsi la qualité de vie de beaucoup de gens, sans parler des coûts inhérents aux réparations ou encore, dans les cas les plus graves, de reconstruction.

Heureusement, il s'effectue présentement beaucoup de recherches sur le sujet à travers le monde. Les sept

conférences internationales qui ont déjà eu lieu sur le sujet démontrent l'importance et l'universalité du problème. Ces congrès ont aussi démontré l'importance de la collaboration entre ingénieurs, chimistes et géologues afin de trouver des réponses aux nombreuses questions soulevées par le problème.

Au moment où l'on commence à bien saisir les mécanismes impliqués dans le processus de réaction et où l'on tente d'enrayer le problème avec certains additifs, on ne possède malheureusement pas encore d'outils infaillibles et rapides afin de déterminer le potentiel de réactivité des granulats.

Des quatre essais normalisés actuellement utilisés afin de quantifier la réactivité des granulats, aucun n'est entièrement satisfaisant.

L'essai chimique, ASTM C-289, donne souvent des résultats contradictoires ou laisse encore la question en suspens en classant le granulat comme étant potentiellement réactif.

L'essai ASTM C-586 avec mini-prismes de roches, est valable pour les cas de réactivité de type

alcalis-carbonate mais non pour les autres types. Pour les cas où l'on soupçonne le granulat dolomitique d'être réactif, l'essai est donc approprié mais on doit alors apporter une attention toute particulière à l'échantillonnage. Vu la petite taille des mini-prismes, il faut s'assurer que ceux-ci soient représentatifs des faciès étudiés.

L'essai avec barres de mortier, ASTM C-227, a perdu beaucoup de crédibilité ces dernières années. Hooton (1987) est venu jeter une douche d'eau froide sur les utilisateurs de cet essai en démontrant que les résultats étaient grandement influencés par le type de récipient utilisé. En respectant uniquement les spécifications de l'ASTM à ce sujet, l'essai ne détecte à peu près aucun cas de réactivité.

Finalement l'essai de l'ACNOR avec prismes de béton, 23.2-4A, est un essai fiable qui détecte à peu près tous les cas de réactivité, une exception étant les roches granitiques exhibant des réactivités de type "expansion tardive". Le désavantage majeur de cet essai demeure la durée de la cure de 365 jours.

Ils se fait actuellement beaucoup de recherche afin de

mettre au point un essai rapide et fiable. Les essais à l'autoclave, l'essai Duggan, l'essai Knudsen, l'essai sud-africain pour ne nommer que ceux-là, semblent donner des résultats intéressants. Notre attention s'est portée plus spécifiquement vers l'essai sud-africain car celui-ci nous semble un compromis acceptable entre les conditions réelles d'un vrai béton et le besoin d'accélérer le mécanisme de réaction.

En plus des barres de mortier, nous avons soumis des prismes de béton à ce nouvel essai. Les prismes ont l'avantage de représenter de façon plus réaliste les conditions de service d'un vrai béton.

VIII.2 Synthèse des facteurs influençant l'essai accéléré

Dans le but de vérifier la pertinence de l'essai accéléré face aux types de granulats rencontrés au Québec nous avons étudié plusieurs paramètres:

-Impact de la normalité de la solution: la normalité de la solution d'immersion influence directement les

pourcentages d'expansion obtenus avec les barres de mortier et les prismes de béton. Plus la normalité est élevée, plus les allongements sont importants. Nous avons choisi de conserver une normalité de 1N pour les essais car celle-ci crée de bonnes expansions tout en étant pratique.

-Impact du rapport eau-ciment: le rapport eau-ciment est un facteur important à contrôler car la porosité est un des paramètres qui influencent le plus les expansions. En effet plus les alcalis peuvent rejoindre facilement les particules réactives, plus la réaction est sévère. Nous préconisons un rapport de 0.45 pour les barres de mortier et de 0.50 pour les prismes de béton.

-Evolution de la normalité de la solution: nos mesures indiquent que la normalité de la solution d'immersion varie fort peu lors de l'essai et il est préférable d'effectuer l'essai sans modifier la solution de départ.

-Impact du temps de mesure: nous préconisons un délai de quinze minutes entre la sortie des échantillons de la chambre à 80°C et la prise de mesures. Ainsi les

mesures sont plus stables et la procédure est plus sécuritaire.

-Influence des contenants: des essais effectués avec des contenants verticaux et horizontaux démontrent que la position des échantillons n'influence pas les expansions. Si l'échantillon est dans une position verticale, il peut donc être déposé directement dans le récipient, et dans le cas des barres de mortier, le plot peut supporter le poids de la barre.

-Produits de réaction: l'analyse des produits de réaction effectuée par fluorescence-X a démontré que les essais accélérés et les essais traditionnels donnaient des gels identiques tant au point de vue de la morphologie que de la composition chimique.

-Dolomies: nos essais démontrent que certaines dolomies ne devraient pas être soumises aux essais accélérés à haute température. Des travaux supplémentaires devraient être effectués à ce sujet.

VII.4: Synthèse des résultats et recommandations

Le tableau 8 présente la synthèse de nos résultats. Vu le comportement des granulats dolomitiques face aux essais à haute température, ces résultats y sont présentés en retrait. En se basant sur ces résultats, nous formulons les recommandations suivantes.

L'essai accéléré avec barres de mortier peut être utilisé comme norme d'acceptation ou de rejet de granulats à béton. Cet essai ne fait que catalyser la réaction et les expansions mesurées sont causées uniquement par la réaction entre les alcalis et les phases siliceuses réactives. La figure 91 démontre la fiabilité de l'essai.

L'essai accéléré avec prismes de béton donne les mêmes résultats que l'essai accéléré avec barres de mortier et peut par conséquent être également utilisé comme norme d'acceptation ou de refus de granulats à béton. La figure 92 démontre la fiabilité de cet essai accéléré.

Le fait que les essais accélérés avec barres de mortier et avec prismes de béton donnent les mêmes résultats suggère que l'essai accéléré avec barres de mortier serait suffisant comme norme d'acceptation. Notre

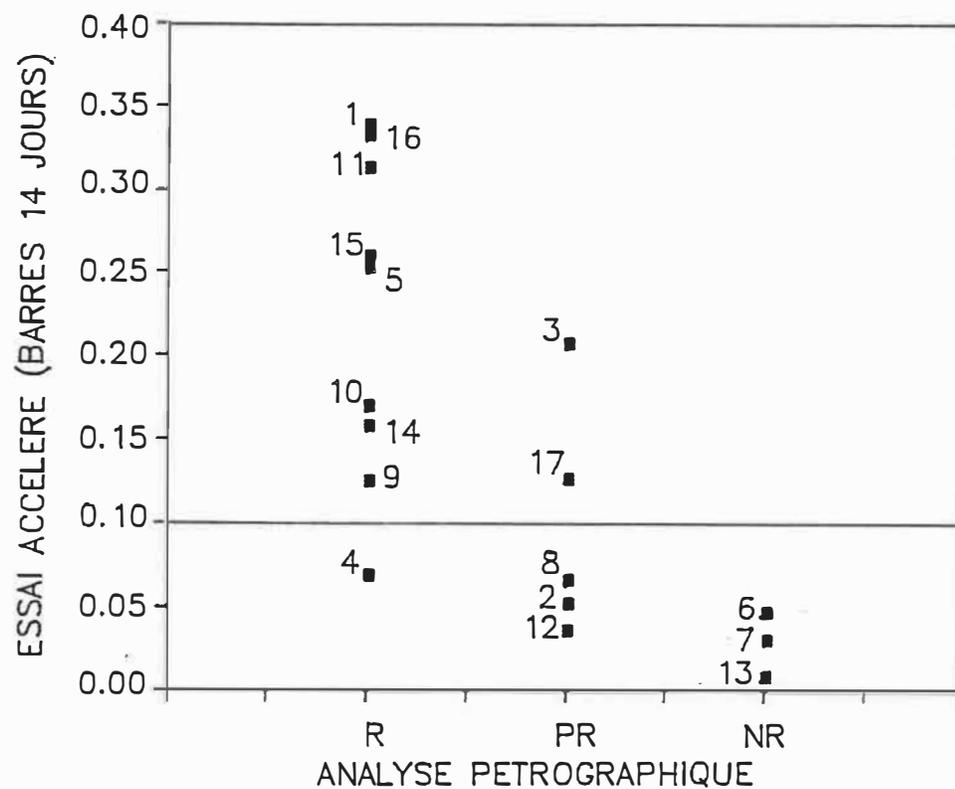
ECHANTILLON	REACTIVITE*	ASTM C-289 (5c)	ASTM C-227 (52 SEM. EXP. %) (38°C, 95% H.R.)	ACROR A23.2-14A (52 SEM. EXP. %) (38°C, 95% H.R.)	BARRES ACCELEREES (14 J. EXP. %) (80°C, NaOH 1N)	PRISMES ACCELERES (24 J. EXP. %) (80°C, NaOH 1N)
1. OTTAWA	1	1017 (PR)	0.186 (R)	0.063 (R)	0.390 (R)	0.100 (R)
2. HULL	2	200 (PR)	0.035 (NR)	0.007 (NR)	0.052 (NR)	0.098 (R)
4. BEAUFORT	1	174 (R)	0.033 (NR)	0.096 (R)	0.069 (NR)	0.053 (R)
5. ST-JEAN	1	240 (PR)	0.054 (NR)	0.071 (R)	0.253 (R)	0.080 (R)
6. VARENNE	3	15 (NR)	0.030 (NR)	0.012 (NR)	0.047 (NR)	0.020 (NR)
8. ST-HYPOLYTE	2	15 (NR)	0.034 (NR)	0.023 (NR)	0.066 (NR)	0.020 (NR)
9. ST-JACQUES	1	418 (PR)	0.038 (NR)	0.095 (R)	0.125 (R)	0.056 (R)
10. BERTHIER	1	348 (PR)	0.049 (NR)	0.042 (R)	0.170 (R)	0.106 (R)
11. TROIS-RIVIERES	1	957 (PR)	0.112 (R)	0.175 (R)	0.313 (R)	0.094 (R)
12. ST-HENDES-LAS	2	8 (PR)	0.028 (NR)	0.001 (NR)	0.036 (NR)	0.010 (NR)
13. ST-CYRILLE	3	7 (NR)	0.013 (NR)	0.004 (NR)	0.068 (NR)	0.013 (NR)
14. SHERBROOKE	1	28 (NR)	0.042 (NR)	0.039 (R)	0.158 (R)	0.074 (R)
15. BEAUDEVILLE	1	34 (NR)	0.059 (NR)	0.099 (R)	0.260 (R)	0.053 (R)
16. CHARLESBOURG	1	334 (PR)	0.074 (NR)	0.044 (R)	0.353 (R)	0.105 (R)
17. CHICOUTIMI	2	666 (PR)	0.032 (NR)	0.034 (NR)	0.126 (R)	0.073 (R)

3. COTERU-DU-LAC	2	174 (PR)	0.043 (NR)	0.041 (R)	0.207 (R)	0.130 (R)
7. LAVEL	3	62 (R)	0.029 (NR)	0.002 (NR)	0.030 (NR)	0.058 (R)

* REACTIVITE: 1-REACTIF (R), 2-POTENTIELLEMENT REACTIF (PR), 3-NON REACTIF (NR).

Tableau 8: Synthèse des résultats

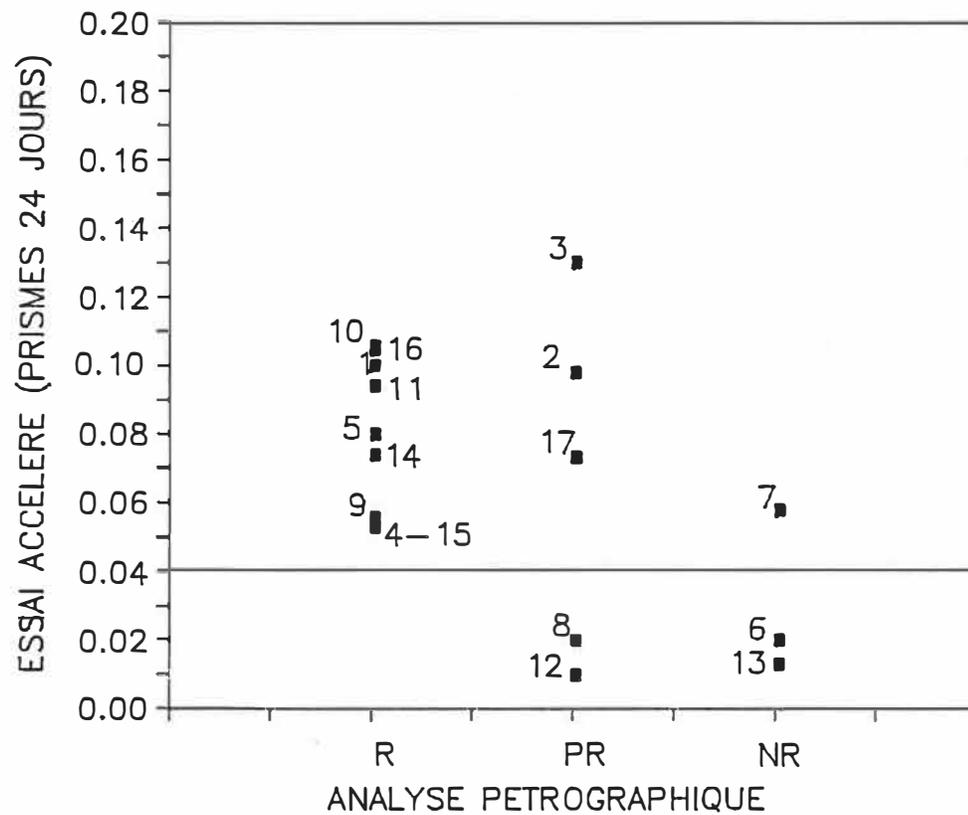
BARRES A 80 vs ANA. PETRO. RELATION



R: REACTIF, PR: POTENTIELLEMENT REACTIF, NR: NON REACTIF

Fig. 91-Relation entre l'essai accéléré sur barres de mortier et l'analyse pétrographique.

PRISMES A 80 vs ANA. PETRO.
RELATION



R: REACTIF, PR: POTENTIELLEMENT REACTIF, NR: NON REACTIF

Fig. 92-Relation entre l'essai accéléré sur prismes de béton et l'analyse pétrographique.

choix est basé sur le fait que l'essai avec barres de mortier demande moins de matériel et que la taille des échantillons est plus pratique lors des manipulations.

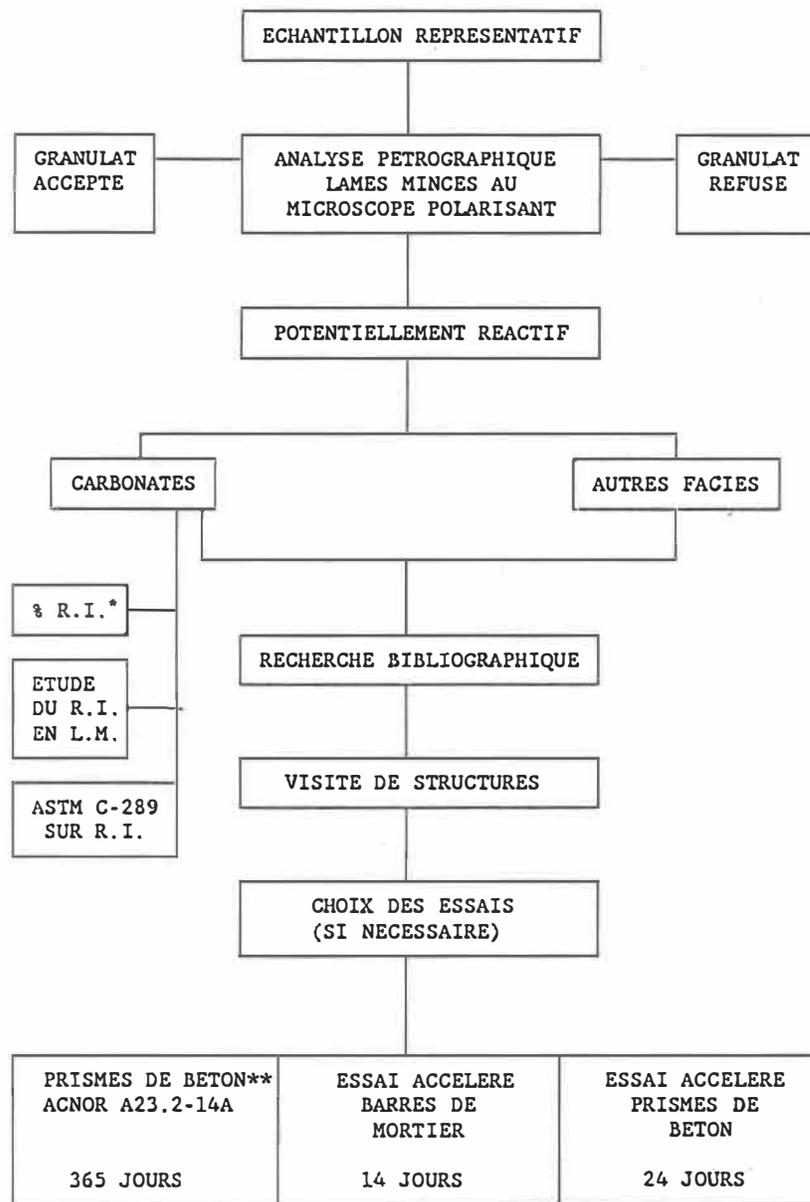
Tous les faciès pétrographiques ne peuvent être soumis à ces essais accélérés à haute-température. L'analyse pétrographique détaillée par un géologue-pétrographe d'expérience doit donc être effectuée au préalable avant de soumettre un granulats à ces essais. Les faciès qui posent certains problèmes, selon nos travaux, sont les suivants:

- Les orthoquartzites: la réactivité des orthoquartzites n'est pas détectée lorsque l'essai est effectuée avec barres de mortier.
- Les dolomies: certaine dolomies réagissent en présence d'alcalis à haute température.
- Les roches granitiques: les roches de ce types montrant une réactivité de type "expansion tardive" ne seront pas détectées par ces essais. Pour ce type de granulats, l'analyse pétrographique demeure le meilleur outil d'analyse.

Les limites d'expansion permise sont basées sur la réactivité des granulats que nous avons soumis à nos essais. Pour les barres, la limite est de 0.10% à 12 jours. Cependant, si les expansions obtenues se situent entre 0.08 et 0.10%, le granulat devrait être considéré comme potentiellement réactif. Dans ces cas, dépendant de l'utilisation du granulat, on devrait suggérer un ciment à faible teneur en alcalis, ou un ajout telle la fumée de silice condensée.

Pour l'essai accéléré avec prismes de béton, la limite d'expansion permise est de 0.04% après 24 jours de cure. Ici, nous considérons que si l'expansion se situe entre 0.035% et 0.04% à 24 jours, le granulat est potentiellement réactif et nous formulons les mêmes recommandations que dans le cas des barres de mortier.

Le tableau 9 résume les étapes à suivre lors de l'étude d'un granulat à être utilisé dans le béton.



* Résidu insoluble.

**Tant que les essais accélérés ne seront pas normalisés.

Tableau 9: Etapes à suivre lors de l'étude d'un granulat à béton.

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..
- ALBERT, P. et RAPHAEL, S., 1987. "Alkali-Silica Reactivity in the Beauharnois Power-House, Beauharnois". 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. 10-16.
- American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1982, Pa., U.S.A., Annual Book of ASTM Standards 04.02, Concrete and Mineral Aggregates, pp. 1-878.
- ASTM C-114: Chemical Analysis of Hydraulic Cement.
 - ASTM C-227: Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate Combinations, (Mortar Bar Method).
 - ASTM C-289: Potential Reactivity of Aggregates, (Chemical Method).
 - ASTM C-586: Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregates, (Rocks Cylinder Method).
- Association Canadienne de Normalisation (ACNOR), 1977, Rexdale, Ontario, Canada, pp. 189-191.
- A23.2-14A: Détermination de la réactivité alcalis-granulat (prismes de béton).
 - A23.2-15A: Examen pétrographique des granulats à béton.
 - A23.1-M77: Annexe B, Réaction alcalis-granulat.
- BENOIT, F.W. et VALIQUETTE, G., 1971. "Région du Lac St-Jean, (partie sud)". R.G. 140, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, pp. 1-24 +cartes.

- BERARD, J., 1980. "Influence de la nature minéralogique des agrégats sur la qualité du béton". Technologie avancée du béton, 2ième édition, P.C. Aitcin 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. 1-25.
- BERARD, J. et LAPIERRE, N., 1977. " Réactivité aux alcalis du grès de Potsdam dans les bétons". Revue Canadienne de Génie Civil, vol. 4, no. 3, pp. 332-344.
- BERARD, J., et ROUX, R., 1986. " La viabilité des bétons du 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, 207 p..
- 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". Revue Canadienne de Génie Civil.
- BUCK, A.D., 1987. "Petrographic Criteria for Recognition of Alkali Reactive Strained Quartz". 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. 419-423.
- HATTERJI, S., 1978. "An Accelerated Method for the Detection of Alkali-Aggregate Reactivity of Aggregates". Cement and Concrete Research, Vol. 8, pp. 647-650.

- CHAURET, E., 1958. "Les réactions agrégat-ciment dans le béton". L'Ingénieur, Vol. 44, No. 174, pp. 12-19.
- CLARK, T.H., 1955. "Région de St-Jean-Beloeil". R.G. 66, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, 92 p. +cartes.
- CLARK, T.H., 1964. "Région de Yamaska-Aston". R.G. 102, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, 10 p. + cartes.
- CLARK, T.H., 1972. "Région de Montréal". R.G. 152, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, 244 p. +cartes.
- CLARK, T.H. et GLOBENSKY, Y., 1976a. "Région des Laurentides (est)". R.G. , Ministère des Richesses Naturelles du Québec, pp. 1-112 +cartes.
- CLARK, T.H. et GLOBENSKY, Y., 1976b. "Région de Trois-Rivières". R.G. 164, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, 98 p. +cartes.
- COUSINEAU, P., 1984. "La Formation de Saint-Daniel et le groupe de Magog entre St-Georges de Beauce et Lac Etchemin". Rapport d'étape, Ministère de l'Energie et des Ressources du Québec.
- DALLAIRE G., 1986. "Réactivité alcali-granulat". Ministère des Transports du Québec, Direction Recherche et Contrôle, Service du Laboratoire Central, 8 p..
- 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.
- DAVIES, G. et OBERHOLSTER, R.E., 1988. "Alkali-Silica Reaction Products and their Development". Cement and Concrete Research, Vol.18, pp. 621-635.
- 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.

- DENT-GLASSER, L.S. et KATAOKA, N., 1981c. "Some Observations on the Rapid Chemical Test for Potentially Reactive Aggregate". Cement and Concrete Research, Vol. 12, pp. 191-196.
- DIAMOND, S., 1975. "Pore Solutions and Alkali-Aggregate Attack". Proceedings of the 2nd International Conference on alkali-aggregate reaction preventive mesures, Reykjavik, Iceland, pp. 165-181.
- DIAMOND, S., BARNEYBACK, R.S. et STRUBLE, L.J., 1981. " On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reactions". Proceedings of the 5th International Conference on alkali-aggregate reaction in concrete, Cape-Town, South-Africa, texte S252/22.
- DOBIE, T.R., 1985. "Correlating Water-Soluble Alkalies to Total Alkalies in Cement - Considerations for Preventing Alkali-Silica Popouts on Slabs". ASTM STP-930, Alkalies in Concrete, pp.46-57.
- DOLAR-MANTUANI, L., 1964. "Expansion of Gull River Carbonate Rock in Sodium Hydroxyde". Highway Research Record Bull., No. 45, pp. 178-195.
- DOLAR-MANTUANI, L., 1972. "Harmful Constituents in Natural Concrete Aggregates in Ontario". 24th ICG, section 13, pp. 227-234.
- DOLAR-MANTUANI, L., 1978. "Practical Aspects of Identifying Alkali-Reactive Aggregate by Petrographic Methods". Compte-rendus de la 4ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Purdue, U.S.A., pp. 267-280.
- DOLAR-MANTUANI, L., 1983. "Handbook of concrete aggregate- a petrographic and technical evaluation". Noyes Publication, New-Jersey, pp. 1-345.
- 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, 310 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.
- DURAND, 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..
- DURAND, M. et BERARD, J., 1974. "Réactivité des roches carbonatées aux alcalis du ciment". *Revue Canadienne de Géotechnique*, Vol. 11, No. 2, pp. 248-256.
- GILLOTT, J.E. et SWENSON, E.G., 1969. "Mechanism of the Alkali-Carbonate Rock Reaction". *Q. J.L. Engineering Geology*, vol. 2, pp. 7-23.
- GLOBENSKY, Y., 1978. "Région de Drummondville". R.G. 192, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, 107 p. +cartes.
- GLOBENSKY, Y., 1982a. "Région de Vaudreuil". R.G. 199, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.
- GLOBENSKY, Y., 1982b. "Région des Laurentides (sw)". MM 82-01, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, 35 p. +cartes.
- GRATTAN-BELLEW, P.E., 1978. "Study of Expansivity of a Suite of Quartzwackes, Argillites and Quartz Arenites" 4th International Conference on the effects of alkalis in cement and concrete, Purdue, U.S.A., pp. 113-140.
- GRATTAN-BELLEW, P.E., 1981a. "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., 1981b. "A Review of Test Methods for Alkali-Expansivity of Concrete Aggregate". Proceedings of the 5th International Conference on alkali-aggregate reaction in concrete, Cape Town, South Africa, texte S252/9.

- 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, 8 p..
- GRATTAN-BELLEW, P.E., DOLAR-MANTUANI, L. et SEREDA, P.J., 1978. "The Aggregate Shortage and High Alkali Cement in a Changing Energy Situation". Can. J. Civil Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 250-261.
- 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, 221 p..
- JENSEN, A.D., CHATTERJI, S., CHISTENSEN, P. et THAULOW, N., 1984. "Studies of Alkali-Silica Reaction-Part II: Effect of Air-Entrainment on Expansion". Cement and Concrete Research, Vol. 14, pp. 311-314.
- 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-grulats dans le béton, Ottawa, Canada, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 289-293.
- LENZNER, D., 1981. "Influence of the Amount of Mixing Water on the Alkali Silica Reaction". Proceedings of the 5th International Conference on alkali-aggregate reaction in concrete, Cape-Town, South-Africa, S252/26.
- MCCOY, W.J., 1978. "Effect of Hydration on Water Solubility of Alkalies in Portland Cement". Compte-rendus de la 4ième Conférence Internationale sur les réactions alcalis-grulats dans le béton, Purdue, U.S.A., pp. 35-45.

- MIELENZ, R.C., GREENE, K.T. et BENTON, E.J., 1947. "Chemical Test for Reactivity of Aggregates with Cement Alkalies - Chemical Processes in Cement Aggregate Reaction". Journal of ACI, Vol. 19, pp. 193-219.
- MING-SHU, T. et SU-FEN, H., 1980. "Effect of Ca(OH)_2 on Alkali-Silica Reaction". 7ième Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 2, pp. 94-99.
- MING-SHU, T., YU-FENG, Y., MEI-GI, Y. et SHI-HUA, Z., 1980. "The Preventive Effect of Mineral Admixtures on Alkali-Silica Reaction and its Mechanism". Cement and Concrete Research, Vol. 13, No. 2, pp. 171-176.
- 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.
- NIXON, P. et PAGE, C., 1987. "Pore Solutions Chemistry and Alkali-Aggregate Reaction". Concrete Durability Katharine and Bryant Mather International Conference, Atlanta, U.S.A., ACI, SPO-100, Vol. 2, S.Scanlon editor, pp. 1-29.
- 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.
- POLLITT, H.W.W. et BROWN, A.W., 1964. "The Distribution of Alkalies in Portland Cement Clinker". 5th International Symposium on the chemistry of cement, Tokyo, Japan, supplementary paper I-126, pp. 322-333.
- PRUD'HOMME, M., 1981. "Caractérisation des granulats de carrière de la région de Montréal". Mémoire de maîtrise Ing. Département de Génie Minéral, Ecole polytechnique de Montréal, 98 p..

- REGOURD, M., HORNAIN, H. et POITEVIN, P., 1981. "The Alkali Aggregate Reaction: Concrete Microstrutural Evolution". Proceedings of the 5th International Conference on alkali aggregate reaction in concrete, Cape-Town, South-Africa, S252/35.
- ROGERS, C.A., 1985. "Evaluation of the Potential for Expansion and Cracking Due to the Alkali Reaction". Ontario Min. of Transportation and Communications, Eng. Mat. Office, Soils and Aggregates Division.
- 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.
- SHIN, G.Y. et GLASSER, F.P., 1983. "Chemistry of Pore Fluids. I. Suspension Reactions $Ca_{3-x}Na_{2x}Al_2O_3$ Solid Solutions With and Without Gypsum Additions". Cement and Concrete Research, Vol. 13, pp. 366-376.
- SOLES, J.A., 1979. "Petrography in the Evaluation of Aggregates and Concrete". CANMET, Energy Mines and Ressources, Ottawa, Canada, Report 80-3E, pp. 1-14.
- SOLES, J.A., 1983. "Thermally Destructive Particles in Sound Dolostone Aggregate from an Ontario Quarry". Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, Vol. 4, No. 2, pp. 99-102.
- 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.

- STRUBLE, L. et DIAMOND, S., 1985. "Influence of Cement Alkali Distribution on Expansivity Due to Alkali Silica Reaction". ASTM STP-930, Alkalies in Concrete, pp. 31-45.
- 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.
- SWENSON, E.G. et GILLOTT, J.E., 1967. "Alkali Reactivity of Dolomitic Limestone Aggregate" Mag. of Concrete Research, Vol. 19, No. 59, pp. 95-104.
- 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.304-308.
- TANG, M.-S. L. et HAN, S.-F., 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.
- VAN AARDT, J.H.P. et VISSER, S., 1977. "Calcium Hydroxyde Attack on Feldspar and Clays: Possible Relevance to Cement Aggregate Reaction". Cement and Concrete Research, Vol. 7, pp. 643-648.
- 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.
- WILDING, L.P., SMECK, N.E. et DRESS, L.R., 1977. "Silica in Soils: Quartz, Cristobalite, Tridymite and Opale". Minerals in soil environments, Soil Science Society of America, pp. 471-552.

YOSHIKA, Y., KASAMI, H., OHNO, S. et SHINOZAKI, Y., 1987.
"Study on a Rapid Method for Evaluation of the
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.
314-318.

ANNEXE A

TABLEAUX PRESENTANT L'ENSEMBLE DES DONNEES

TABLEAU A.1: RESULTATS DES ESSAIS ASTM C-227

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSION (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
14	0.009	0.010	0.008	0.012	0.014	0.011	0.008
30	0.025	0.014	0.010	0.012	0.017	0.012	0.011
60	0.077	0.016	0.017	0.018	0.028	0.018	0.015
90	0.120	0.020	0.024	0.021	0.036	0.019	0.017
120	0.130	0.021	0.027	0.022	0.041	0.021	0.017
180	0.170	0.021	0.030	0.024	0.044	0.024	0.017
240	0.175	0.025	0.037	0.033	0.050	0.025	0.021
365	0.186	0.035	0.043	0.033	0.052	0.030	0.029

* GRANULAT: 1-OTTAWA
 2-HULL
 3-COTEAU-du-LAC
 4-BEAUHARNOIS
 5-ST-JEAN
 6-VARENNES
 7-LAVAL

TABLEAU A.1: (SUITE)

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSION (%)				
	8	9	10	11	12
14	0.013	0.006	0.010	0.009	0.007
30	0.016	0.007	0.013	0.032	0.007
60	0.018	0.015	0.028	0.067	0.008
90	0.021	0.019	0.029	0.086	0.009
120	0.023	0.020	0.031	0.095	0.010
180	0.023	0.025	0.033	0.103	0.012
240	0.031	0.029	0.036	0.106	0.012
365	0.034	0.038	0.049	0.112	0.028

* GRANULAT: 8-ST-HYPPOLYTE
9-ST-JACQUES
10-BERTHIER
11-TROIS-RIVIERES
12-ST-WENCESLAS

TABLEAU A.1: (SUITE)

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSION (%)				
	13	14	15	16	17
14	0.000	0.016	0.010	0.009	0.008
30	0.000	0.017	0.013	0.017	0.010
60	0.000	0.023	0.021	0.038	0.016
90	0.002	0.027	0.039	0.052	0.020
120	0.002	0.031	0.040	0.063	0.023
180	0.002	0.031	0.051	0.066	0.026
240	0.004	0.036	0.056	0.070	0.028
365	0.013	0.042	0.059	0.074	0.032

* GRANULAT: 13-ST-CYRILLE
 14-SHERBROOKE
 15-BEAUCEVILLE
 16-CHARLESBOURG
 17-CHICOUTIMI

TABLEAU A.2: RESULTATS DES ESSAIS ACNOR A23.2-14A

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSIONS (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
7	0.003	0.000	0.002	0.003	0.003	0.001	0.000
14	0.004	0.000	0.002	0.004	0.005	0.002	0.000
28	0.004	0.002	0.003	0.007	0.008	0.004	0.000
56	0.008	0.002	0.005	0.010	0.015	0.006	0.000
84	0.009	0.003	0.007	0.022	0.025	0.008	0.000
112	0.019	0.004	0.012	0.028	0.029	0.009	0.000
168	0.035	0.004	0.018	0.039	0.043	0.009	0.000
224	0.051	0.004	0.030	0.053	0.055	0.011	0.000
280	0.059	0.004	0.037	0.075	0.060	0.011	0.001
365	0.063	0.007	0.041	0.096	0.071	0.012	0.002

*GRANULAT: 1-OTTAWA
 2-HULL
 3-COTEAU-du-LAC
 4-BEAUHARNOIS
 5-ST-JEAN
 6-VARENNES
 7-LAVAL

TABLEAU A.2: (SUITE)

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSIONS (%)				
	8	9	10	11	12
7	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000
14	0.004	0.000	0.004	0.003	0.000
28	0.008	0.002	0.006	0.007	0.000
56	0.012	0.007	0.007	0.018	0.000
84	0.016	0.007	0.010	0.038	0.000
112	0.016	0.014	0.012	0.050	0.000
168	0.016	0.020	0.017	0.125	0.000
224	0.020	0.034	0.029	0.157	0.000
280	0.020	0.052	0.036	0.169	0.000
365	0.023	0.055	0.042	0.175	0.000

*GRANULAT: 8-ST-HYPPOLYTE
9-ST-JACQUES
10-BERTHIER
11-TROIS-RIVIERES
12-ST-WENCESLAS

TABLEAU A.2: (SUITE)

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSIONS (%)				
	13	14	15	16	17
7	0.000	0.003	0.000	0.000	0.002
14	0.000	0.003	0.001	0.004	0.002
28	0.002	0.003	0.003	0.007	0.003
56	0.002	0.005	0.005	0.008	0.006
84	0.002	0.008	0.014	0.011	0.008
112	0.002	0.009	0.026	0.013	0.008
168	0.002	0.010	0.059	0.013	0.010
224	0.003	0.019	0.086	0.022	0.017
280	0.003	0.029	0.097	0.031	0.026
365	0.004	0.039	0.099	0.034	0.034

*GRANULAT: 13-ST-CYRILLE
14-SHERBROOKE
15-BEAUDEVILLE
16-CHARLESBOURG
17-CHICOUTIMI

TABLEAU A.3: RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES SUR PRISMES DE BETON

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSIONS (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.008	0.006	0.010	0.000	0.007	0.002	0.006
5	0.016	0.014	0.022	0.006	0.013	0.005	0.011
7	0.040	0.020	0.032	0.012	0.020	0.006	0.015
9	0.051	0.031	0.045	0.019	0.028	0.007	0.020
12	0.053	0.048	0.063	0.025	0.040	0.007	0.028
14	0.055	0.059	0.076	0.045	0.046	0.009	0.037
18	0.067	0.082	0.096	0.048	0.060	0.018	0.042
20	0.082	0.088	0.104	0.051	0.067	0.018	0.048
24	0.100	0.098	0.130	0.053	0.080	0.020	0.058

*GRANULAT: 1-OTTAWA
 2-HULL
 3-COTEAU-du-LAC
 4-BEAUHARNOIS
 5-ST-JEAN
 6-VARENNE
 7-LAVAL

TABLEAU A. 3: (SUITE)

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSION (%)				
	8	9	10	11	12
2	0.003	0.004	0.007	0.009	0.002
5	0.006	0.008	0.020	0.016	0.003
7	0.007	0.011	0.025	0.024	0.003
9	0.009	0.014	0.036	0.035	0.004
12	0.011	0.019	0.050	0.049	0.004
14	0.014	0.023	0.065	0.056	0.005
18	0.017	0.032	0.079	0.073	0.006
20	0.018	0.039	0.093	0.079	0.007
24	0.020	0.056	0.106	0.094	0.010

*GRANULAT: 8-ST-HYPPOLYTE
9-ST-JACQUES
10-BERTHIER
11-TROIS-RIVIERES
12-ST-WENCESLAS

TABLEAU A.3: (SUITE)

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSIONS (%)				
	13	14	15	16	17
2	0.003	0.003	0.003	0.005	0.003
5	0.004	0.012	0.007	0.012	0.012
7	0.004	0.017	0.012	0.023	0.012
9	0.005	0.025	0.018	0.031	0.022
12	0.007	0.039	0.028	0.048	0.032
14	0.007	0.044	0.035	0.058	0.039
18	0.010	0.055	0.039	0.077	0.057
20	0.012	0.070	0.043	0.090	0.063
24	0.013	0.074	0.053	0.105	0.073

*GRANULAT: 13-ST-CYRILLE
 14-SHERBROOKE
 15-BEAUCEVILLE
 16-CHARLESBOURG
 17-CHICOUTIMI

TABLEAU A.4: RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES SUR BARRES DE MORTIER

AGE (JOURS)	GRANULATS*						
	EXPANSIONS (%), e/c						
	0.45 0.50						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.021	0.007	0.058	0.011	0.047	0.009	0.008
	0.022	0.004	0.030	0.018	0.062	0.002	0.008
5	0.155	0.020	0.109	0.032	0.116	0.025	0.016
	0.197	0.018	0.094	0.035	0.131	0.028	0.016
7	0.213	0.028	0.134	0.040	0.155	0.032	0.021
	0.233	0.029	0.130	0.042	0.186	0.039	0.025
9	0.266	0.036	0.160	0.050	0.187	0.036	0.025
	0.278	0.037	0.168	0.063	0.221	0.048	0.030
12	0.313	0.047	0.204	0.062	0.231	0.043	0.030
	0.385	0.049	0.177	0.080	0.271	0.054	0.034
14	0.339	0.052	0.207	0.069	0.253	0.047	0.030
	0.400	0.053	0.193	0.080	0.295	0.056	0.038

*GRANULAT: 1-OTTAWA
 2-HULL
 3-COTEAU-du-LAC
 4-BEAUHARNOIS
 5-ST-JEAN
 6-VARENES
 7-LAVAL

TABLEAU A.4: (SUITE)

AGE (JOURS)	GRANULAT*				
	EXPANSION (%), e/c				
	8	9	10	11	12
2	0.012	0.013	0.028	0.060	0.008
	0.008	0.019	0.040	0.086	---
5	0.014	0.087	0.075	0.150	0.016
	0.028	0.050	0.091	0.195	---
7	0.025	0.085	0.100	0.172	0.023
	0.035	0.067	0.121	0.250	---
9	0.036	0.100	0.130	0.236	0.025
	0.048	0.080	0.138	0.295	---
12	0.054	0.120	0.160	0.283	0.032
	0.059	0.110	0.177	0.354	---
14	0.066	0.125	0.170	0.313	0.036
	0.068	0.117	0.200	0.394	---

*GRANULAT: 8-ST-HYPPOLYTE
9-ST-JACQUES
10-BERTHIER
11-TROIS-RIVIERES
12-ST-WENCESLAS

TABLEAU A.4: (SUITE)

AGE (JOURS)	GRANULAT* EXPANSIONS (%), e/c 0.45 0.50				
	13	14	15	16	17
2	0.001	0.022	0.024	0.058	0.020
	0.002	0.020	0.034	0.124	0.023
5	0.007	0.066	0.110	0.140	0.051
	0.006	0.050	0.143	0.211	0.063
7	0.008	0.120	0.150	0.192	0.069
	0.009	0.087	0.185	0.261	0.087
9	0.008	0.150	0.190	0.243	0.088
	0.012	0.099	0.210	0.311	0.114
12	0.008	0.190	0.230	0.297	0.112
	0.015	0.131	0.258	0.395	0.136
14	0.008	0.216	0.260	0.333	0.126
	0.016	0.158	0.282	0.418	0.152

*GRANULAT: 13-ST-CYRILLE
 14-SHERBROOKE
 15-BEAUCEVILLE
 16-CHARLESBOURG
 17-CHICOUTIMI

TABLEAU A.5: RESULTATS DES ESSAIS ASTM C-289

GRANULAT	REDUCTION DE L'ALCALINITE (millimoles/litre)	SILICE DISSOUE (millimoles/litre)
1. OTTAWA	186	1017
2. HULL	186	200
3. COTEAU-du-LAC	127	174
4. BEAUHARNOIS	23	46
5. ST-JEAN	88	15
6. VARENNES	214	240
7. LAVAL	72	62
8. ST-HYPPOLYTE	17	15
9. ST-JACQUES	222	418
10. BERTHIER	249	348
11. TROIS-RIVIERES	232	957
12. ST-WENCESLAS	137	8
13. ST-CYRILLE	101	7
14. SHERBROOKE	14	28
15. BEAUCEVILLE	42	34
16. CHARLESBOURG	164	334
17. CHICOUTIMI	244	666

**TABLEAU A.6: RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES AVEC BARRES DE MORTIER
AVEC VARIATION DE LA NORMALITE DE LA SOLUTION**

GRANULAT	NORMALITE DE LA SOLUTION		
	0.6	1.0	1.4
	% D'EXPANSION		
1. OTTAWA	0.172	0.313	0.419
2. TROIS-RIVIERES	0.195	0.283	0.378
3. BEAUCEVILLE	0.210	0.235	0.299
4. ST-CYRILLE	0.003	0.008	0.018
5. SHERBROOKE	0.096	0.157	0.193

**TABLEAU A.7: RESULTATS DES ESSAIS ACCELERES AVEC PRISMES DE
BETON AVEC VARIATION DE LA NORMALITE DE LA SOLUTION**

GRANULAT	NORMALITE DE LA SOLUTION		
	0.6	1.0	1.4
	% D'EXPANSION		
1. TROIS-RIVIERES	0.049	0.090	0.118
2. CHARLESBOURG	0.061	0.105	0.151

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00257211 1