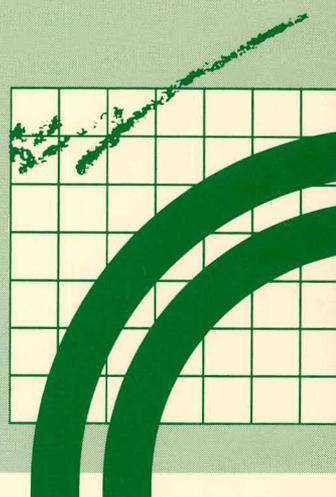


**ÉTUDES ET  
RECHERCHES  
EN TRANSPORTS**



# **INSPECTION DES STRUCTURES DE BÉTON DE LA RÉGION DE QUÉBEC CONSTRUITES AVEC DES MATÉRIAUX CALCAIRES**

**MARC-ANDRÉ BÉRUBÉ  
ATHANASE CLAVEAU  
BENOIT FOURNIER  
DANIEL VÉZINA**



**ESSAIS  
ET MATÉRIAUX**

CANQ  
TR  
GE  
SM  
180  
108

**Québec** 

177342

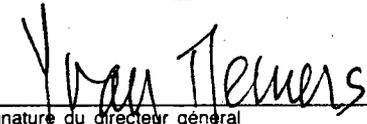
INSPECTION DES STRUCTURES DE BÉTON DE LA RÉGION DE QUÉBEC  
CONSTRUITES AVEC DES GRANULATS CALCAIRES

DR-Ce-Mm  
CANQ  
TR  
GE  
SM  
180

MINISTÈRE DES TRANSPORTS  
CENTRE DE DOCUMENTATION  
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,  
21<sup>e</sup> ÉTAGE  
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA  
G1R 5H1

Dépôt légal - 1<sup>er</sup> trimestre 1988  
Bibliothèque nationale du Québec  
ISBN 2-550-18335-5



Titre et sous-titre du rapport <b>INSPECTION DES STRUCTURES DE BETON DE LA REGION DE QUEBEC CONSTRUITES AVEC DES GRANULATS CALCAIRES</b>				N° du rapport Transports Québec <b>RJQ-87-13</b>		
Auteur(s) du rapport <b>Marc-André Bérubé, Athanase Claveau, Benoit Fournier, Daniel Vézina</b>				Rapport d'étape <input type="checkbox"/> An Mois Jour Rapport final <input checked="" type="checkbox"/> N° du contrat Date du début d'étude Date de fin d'étude Coût de l'étude		
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Service du laboratoire central 2700, rue Einstein Sainte-Foy QC G1P 3W8			Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Ministère des Transports du Québec 700, boul. Saint-Cyrille Est Québec QC G1R 5H1			
But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires Réalisée conjointement avec des chercheurs de l'Université Laval (Sainte-Foy QC), le but de cette étude a été de caractériser le granulats calcaire de la région de Québec au point de vue potentiel de réactivité alcaline, ainsi que d'évaluer l'état général des structures construites avec ce granulats.						
Résumé du rapport <p>Dans la région de Québec, les calcaires forment la principale source de granulats à béton. Cette étude présente les résultats des essais effectués sur des échantillons de roche provenant des diverses carrières de la région de Québec, pour en évaluer la stabilité chimique dans le béton (potentiel de recherche alcaline).</p> <p>En parallèle, l'étude présente les résultats de l'expertise détaillée d'environ 300 structures en béton de la région de Québec. Chaque composante de ces structures est décrite selon la présence des principaux défauts affectant les structures, selon les conditions d'exposition. Des carottes ont été prélevées d'environ 70 structures. Elles ont été étudiées pour déterminer leurs propriétés physico-mécaniques, ainsi que le contenu en air entraîné et en ions chlorure.</p> <p>Chaque échantillon a également été soumis à un examen pétrographique détaillé. Cette étude a pour but de préciser la condition actuelle des structures, de reconnaître les principaux défauts, de préciser leur fréquence en fonction de l'âge de la structure et d'établir, enfin, l'influence du phénomène de réactivité alcali-granulats dans le processus de détérioration.</p>						
Nbre de pages	Nbre de photos	Nbre de figures	Nbre de tableaux	Nbre de références bibliographiques	Langue du document <input checked="" type="checkbox"/> Français <input type="checkbox"/> Anglais	Autre (spécifier)
Mots-clés Réactivité alcali-granulat, béton, structure de béton, structure, examen pétrographique, calcaires				Autorisation de diffusion <input checked="" type="checkbox"/> Diffusion autorisée <input type="checkbox"/> Diffusion interdite  Signature du directeur général		
				Date 880115		

## TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES .....	
LISTE DES TABLEAUX .....	
I. INTRODUCTION .....	1
II. REGION DE QUEBEC - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE .....	3
III. RESULTATS DES TRAVAUX DE LABORATOIRE SUR LES GRANULATS .....	5
III.1 Géologie, pétrographie et échantillonnage des carrières .....	5
III.2 Essais de laboratoire sur les échantillons de carrières .....	10
III.2.1 Essais physico-mécaniques .....	10
III.2.2 Essais d'évaluation du potentiel de réactivité alcaline .....	15
- Essai de la Méthode Chimique (ASTM C289) et essai modifié sur résidus insolubles .....	15
- Essai du Cylindre de roche (ASTM C586) .....	17
- Essai de la Barre de Mortier (ASTM C227) .....	19
- Essai du Prisme de Béton (ACNOR CAN3-A23.2-14A) .....	24
III.3 Conclusion sur les essais de laboratoire ..	26

IV.	RESULTATS DES TRAVAUX SUR LES STRUCTURES DE BETON	...	28
IV.1	Généralités	.....	28
IV.2	Résultats de l'inspection visuelle	.....	31
IV.2.1	Etat général des structures	.....	31
IV.2.2	Fissuration longitudinale	.....	33
IV.2.3	Fissuration polygonale	.....	36
IV.2.4	Ecaillage	.....	40
IV.2.5	Eclatements (pop outs)	.....	41
IV.2.6	Délaminations et traces de rouille	.	42
IV.2.7	Exsudations	.....	43
IV.3	Conclusion sur l'expertise visuelle	.....	43
IV.4	Analyses de laboratoire	.....	45
IV.4.1	Résistance à la compression, absorption et vides perméables	....	45
IV.4.2	Caractéristiques des vides d'air (ASTM C457)	.....	49
IV.4.3	Teneur en chlorures	.....	52
IV.4.4	Examen pétrographique des carottes de béton	.....	54
V.	DISCUSSION	.....	63
VI.	CONCLUSION	.....	70
VII.	REMERCIEMENTS	.....	72
VIII.	REFERENCES	.....	73

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	Variations annuelles de température dans la région de Québec; périodes de l'année caractérisées par de fréquents cycles de gel et dégel ou de gel prolongé .....	4
FIGURE 2	Précipitations annuelles dans la région de Québec. Les données sur les précipitations de neige sont présentées en millimètres-équivalents de pluie .....	4
FIGURE 3	Corrélations stratigraphiques entre les carrières étudiées .....	6
FIGURE 4	Planche photographique (Pétrographie des calcaires de la région de Québec) .....	9
FIGURE 5	Résultats de l'essai de la Méthode chimique (ASTM C289) et de la version modifiée (sur résidus insolubles) .....	16
FIGURE 6	Résultats de l'essai du Cylindre de Roche (ASTM C586) .....	18
FIGURE 7	Résultats de l'essai de la Barre de Mortier (ASTM C227) .....	20
FIGURE 8	Nombre moyen de défauts affectant les structures en béton de la région en fonction de l'année de construction .....	35
FIGURE 9	Fréquence des défauts affectant les structures de la région en fonction de l'année de construction .....	35

FIGURE 10	Fréquence des défauts apparaissant sur les différentes composantes des structures de la région en fonction de l'année de construction .....	37
FIGURE 11	Planche photographique (Inspection visuelle des structures de béton) .....	39
FIGURE 12	Caractéristiques du réseau de bulles d'air mesurées dans des échantillons prélevés dans une cinquantaine de structures en béton de la région de Québec .....	51
FIGURE 13	Epandage de sels sur les routes de la province de Québec au cours des 20 dernières années. Source: Ministère des Transports .....	51
FIGURE 14	Planche photographique (Examen pétrographique des carottes de béton) .....	59

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	Compilation statistique des résultats des essais de contrôle de la qualité globale des échantillons en fonction des trois principaux faciès pétrographiques reconnus dans la séquence de calcaires régionaux .....	11
TABLEAU 2	Norme sur les propriétés physiques et mécaniques des granulats pour infrastructure, sous-fondation et fondation .....	12
TABLEAU 3	Norme sur les propriétés physiques et mécaniques des gros granulats pour béton de ciment et béton bitumineux .....	13
TABLEAU 4	Expansion des cylindres de roche (ASTM C586) ..	18
TABLEAU 5	Expansion des barres de mortier (ASTM C227) ..	20
TABLEAU 6	Résultats d'essais de prismes de béton (ACNOR A23.2-14A) effectués avec des granulats calcaires des régions de Trois-Rivières (TR), de Québec (F2) et d'Ottawa .....	26
TABLEAU 7	Résultats de l'inspection visuelle des structures du district de Québec .....	32
TABLEAU 8	Répartition des défauts en fonction de l'année de construction des structures examinées .....	34
TABLEAU 9	Caractéristiques des composantes échantillonnées .....	46

TABLEAU 10	Caractéristiques physico-mécaniques des échantillons de béton .....	47
TABLEAU 11	Teneurs en chlorures des échantillons de béton .....	53
TABLEAU 12	Résultats de l'examen pétrographique d'échantillons de béton contenant des granulats calcaires .....	60

## I. INTRODUCTION

Pendant bien longtemps, les gens ont associé la durabilité du béton à sa résistance mécanique. Cette relation s'est cependant souvent avérée erronée, spécialement pour les bétons soumis à des environnements agressifs (Calleja 1980, Rasheeduzzafar et al. 1984), ou contenant des ingrédients de qualité douteuse. La détérioration du béton n'est en fait que rarement associable à une cause unique; elle résulte plutôt de l'effet combiné d'une foule de facteurs (Weaver & Isabelle 1968, Frohnsdorff & Masters 1980, Calleja 1980, Neville 1981, Regourd 1982, Idorn & Røy 1984, Oberholster et al. 1984). L'examen attentif de l'ensemble de ces facteurs démontre bien qu'un travail consciencieux, tant dans le choix et le contrôle de la qualité des matériaux, que dans la mise en oeuvre de l'ensemble des travaux de construction, représente une prémisse de base à la durabilité du béton.

Les propriétés des granulats jouent un rôle prépondérant tant sur la résistance du béton, que sur son comportement structural ou en durabilité (Neville 1981). Lorsqu'ils sont utilisés dans le béton, les granulats sont introduits dans un milieu fortement basique et alcalin où certaines phases minérales, généralement stables dans les conditions environnementales naturelles, peuvent provoquer d'importantes détériorations engendrées par des réactions chimiques expansives appelées réactions alcalis-granulats (Stanton 1940, Diamond 1975, Dent-Glasser & Kataoka 1981).

Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, entre Ottawa et Québec, les calcaires constituent la principale source de granulats à béton. Certains calcaires dolomitiques argileux de la Formation de Gull River rencontrés dans la région de Kingston (Swenson & Gillott 1960, Dolar-Mantuani 1964, Smith 1972, Rogers 1985), ainsi que des calcaires siliceux du Membre de Saint-Casimir (Formation de Neuville), utilisés dans la région de Trois-Rivières (Bérard & Roux 1986, Houde 1986), sont actuellement reconnus comme susceptibles respectivement de réactivité alcalis-carbonates et de réactivité alcalis-silice dans le béton.

L'étude du potentiel de réactivité alcalis-granulats des calcaires de la région de Québec a été entreprise parce que: 1) ces calcaires appartiennent à la même formation géologique que ceux de Trois-Rivières, et 2) qu'un certain nombre de composantes de structures de béton de la région présentent des indices de détérioration généralement associés (quoique non exclusivement) à ce phénomène: motif de fissuration polygonale du type "map-cracking", exsudations, expansions et éclatement du béton, etc..

Dans un premier temps, l'étude détermine les caractéristiques pétrographiques, physico-mécaniques et chimiques des différents faciès de calcaires exploités dans la région de Québec (Fournier & Bérubé 1985).

Dans une deuxième étape, l'inspection détaillée de près de 300 structures en béton de la région a permis 1) d'évaluer l'état global de ces structures, 2) de reconnaître les principaux défauts et d'en établir la sévérité, 3) de vérifier s'il existe une relation entre l'état des structures, leur âge et leur degré d'exposition aux intempéries, et enfin 4) d'établir l'influence du phénomène de réactivité alcalis-granulats sur la détérioration de ces structures.

## II. REGION DE QUEBEC - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

La région métropolitaine de Québec est sise de part et d'autre du fleuve Saint-Laurent, à quelques 250 kilomètres au nord-est de Montréal. Couvrant une superficie de 2800 km<sup>2</sup>, elle forme la seconde région de la province de Québec en terme de densité de population et d'activité économique. La température moyenne annuelle y est de 4,1 C, variant de -9,1 C pour les quatre principaux mois d'hiver (décembre à mars), à 17,6 C pour les mois plus chauds d'été (juin à août) (voir figure 1). Des périodes de gel prolongé ou de fréquents cycles de gel et dégel se produisent entre octobre et avril (voir figure 1). Les précipitations sont généralement importantes dans la région (voir figure 2), où règne une humidité relative moyenne annuelle de 61% (écart-type: 9.2%) (Communauté Urbaine de Québec 1983).

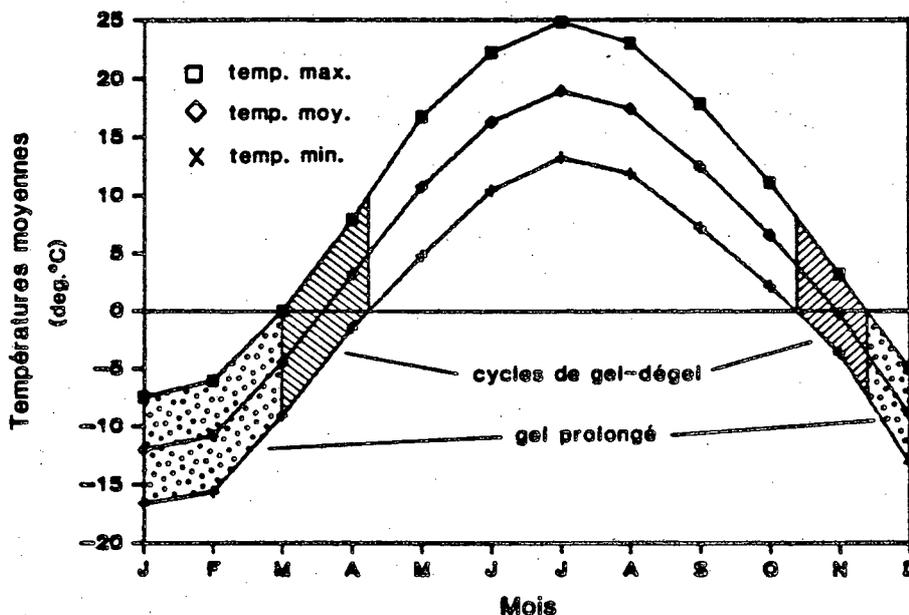


Figure 1 Variations annuelles de température dans la région de Québec; les périodes de l'année caractérisées par de fréquents cycles de gel et dégel ou de gel prolongé.

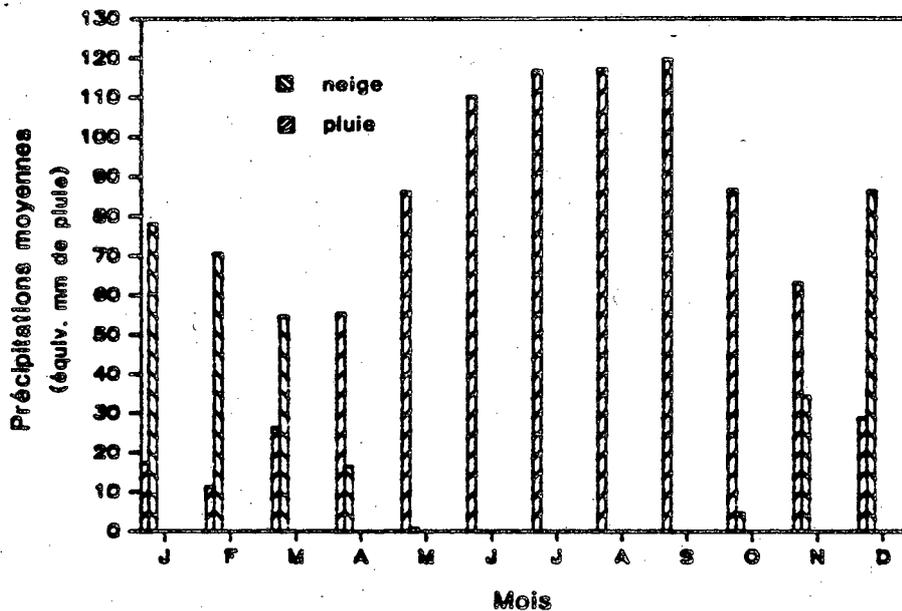


Figure 2 Précipitations annuelles dans la région de Québec. Les données sur les précipitations de neige sont présentées en millimètres-équivalents de pluie.

### III. RESULTATS DES TRAVAUX DE LABORATOIRE SUR LES GRANULATS

#### III.1 GEOLOGIE, PETROGRAPHIE ET ECHANTILLONNAGE DES CARRIERES

Les granulats à béton de la région de Québec sont essentiellement constitués de calcaires fins, plus ou moins argileux et schisteux. Ces calcaires forment une séquence stratigraphique plutôt homogène de bancs faiblement ondulants et d'épaisseur variant généralement entre 5 et 20 centimètres, séparés par des interlits de schistes argileux. Ces derniers, qui deviennent plus abondants vers le sommet de la séquence, où ils peuvent atteindre jusqu'à 25% de l'épaisseur des lits (Fournier & Bérubé 1985), sont en grande partie éliminés lors de la préparation (concassage et tamisage) des granulats.

Quatre carrières couvrant l'ensemble de la séquence stratigraphique régionale ont été cartographiées et échantillonnées en détail, leur position stratigraphique relative étant déterminée par la présence d'excellents marqueurs stratigraphiques, des lits de cendres volcaniques appelés "K-bentonite" (Brun & Chagnon 1979) (voir figure 3). Deux types d'échantillons ont ainsi été prélevés: 1) 85 échantillons-composites, chacun d'eux représentant au plus une épaisseur de trois mètres de lits calcaires, et 2) 108 échantillons-blocs représentatifs des principaux types pétrographiques reconnus dans chacun des échantillons-composites.

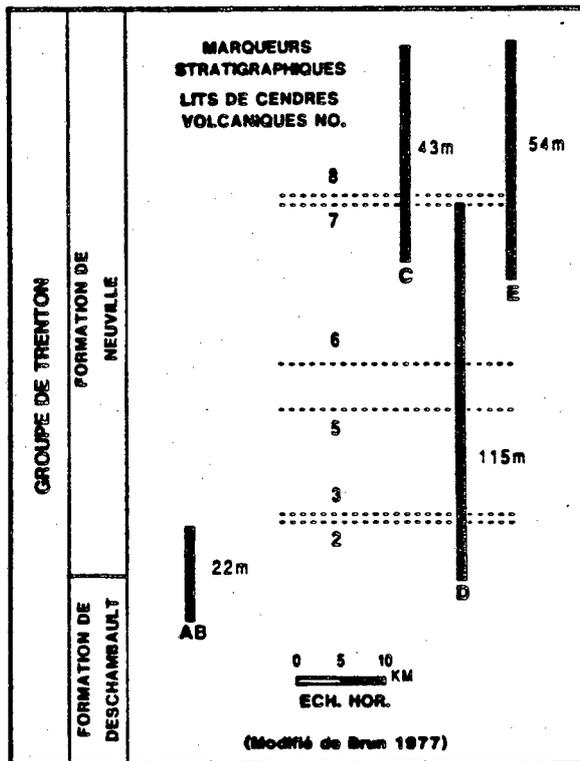


Figure 3 Corrélations stratigraphiques entre les carrières étudiées.

Les calcaires ont été subdivisés en trois faciès pétrographiques (Grabau 1904, Dunham 1962, Fournier & Bérubé 1985):

Faciès I (Calcarénite à texture de grainstone): calcaires grenus, de couleur gris pâle ou beige, composés d'abondants fragments fossilifères (surtout des crinoïdes et des bryozoaires) cimentés par de la calcite cristalline (sparite) (voir figure 4A). Ces calcaires sont formés généralement à plus de 95% de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). On les retrouve principalement à la base de la séquence stratigraphique régionale.

Faciès II (Calcilutite à texture de mudstone à passées de wackestone): calcaires finement grenus de couleur gris moyen à foncé, parfois schisteux, et montrant, en lame mince, un mélange de deux principaux microfaciès (voir figure 4B): 1) des zones pâles contenant de petits fragments de fossiles englobés dans un ciment de calcite (microsparite-sparite), et 2) des plages brun foncé composées majoritairement de grains de calcite (<10 micromètres) enrobés dans une matrice siliceuse et argileuse (quartz cryptocristallin, illite et interstratifiés illite-smectite) (voir figures 4C et 4D). On y retrouve également des quantités variables d'éléments siliciclastiques (grains de quartz, feldspath, etc.) en grains anguleux ou subanguleux.

A l'intérieur de la séquence correspondant à un échantillon-composite donné, l'abondance relative des deux microfaciès décrits plus haut varie largement d'un lit à l'autre. Les échantillons-blocs peuvent néanmoins être subdivisés en deux "sous-faciès" sur la base de l'abondance relative du microfaciès siliceux-argileux (II-1: <50% ; II-2: >50%). Les roches appartenant au faciès II contiennent entre 4 et 24% de résidus insolubles et représentent le constituant majeur de la séquence de calcaires régionaux.

Faciès III (Calcilutite à texture de mudstone "sensu-strictu"): "membre-ultime" des roches du faciès II, constitué de plus de 90% du microfaciès siliceux-argileux décrit plus haut. Ces roches

A. Micrographie d'un calcaire grenu du type calcarénite à texture de grainstone (Faciès I) montrant des bioclastes de crinoïde (c) cimentés par de la sparite d'épitaixie (s). Les pores de ces bioclastes sont très souvent remplis de micrite (m). (Microscope optique, lumière polarisée; échelle 1mm).

B. Micrographie d'un calcaire fin montrant un mélange de plages pâles composées de fins bioclastes cimentés par de la microsparite-sparite (ms) et de plages brunes composées de petits grains de micrite et de microsparite (mi). Mégascopiquement, on décrit cette roche comme une calcilutite à texture de mudstone avec passées de wackestone (Faciès II). L'examen en lame mince permet de décrire plus précisément cette roche comme un mélange de plages de biopelsparite et de plages de biomicrite. (Microscope optique, lumière polarisée; échelle 3mm).

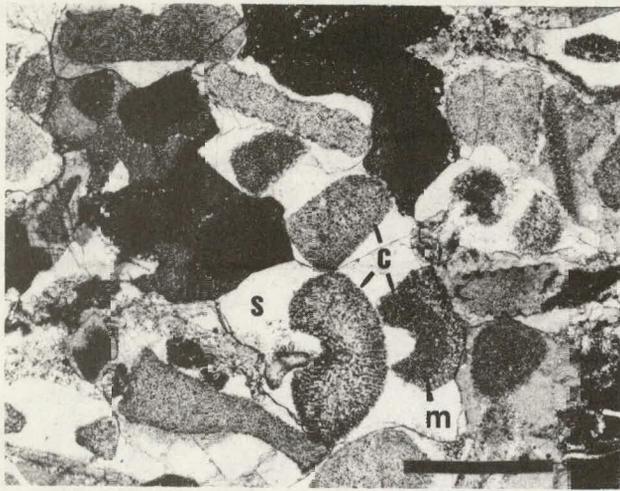
C. Photographie d'une plaque de calcaire fin (Faciès II) dont la surface a été attaquée par une solution d'acide chlorhydrique diluée. Les zones composées de fins bioclastes cimentés par de la microsparite-sparite (ms, voir aussi Figure 4B), riches en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), ont été intensivement attaquées par l'acide; tandis que les zones composées de petits grains de micrite et de microsparite (mi) ont laissé un important résidu insoluble plus pâle que la roche originale. (Stéréomicroscope; échelle 8mm).

D. Micrographie prise au microscope électronique à balayage et spectre d'analyse chimique en dispersion d'énergie des rayons X montrant la texture et la composition chimique du résidu insoluble laissé par les plages de micrite et microsparite (mi) observées sur les micrographies précédentes. Il s'agit d'un fin réseau alvéolaire dont les éléments ont en moyenne 10 micromètres de diamètre, ce qui correspond à la taille des grains de microsparite formant la majeure partie de la matrice de ces plages. Le matériel formant ce réseau insoluble est typiquement composé de silicium et d'aluminium. Rappelons que les roches appartenant au Faciès III ne sont qu'en somme des variétés du Faciès II qui sont constituées à plus de 90% de plages de micrite et microsparite. (Faciès II; échelle 10 micromètres).

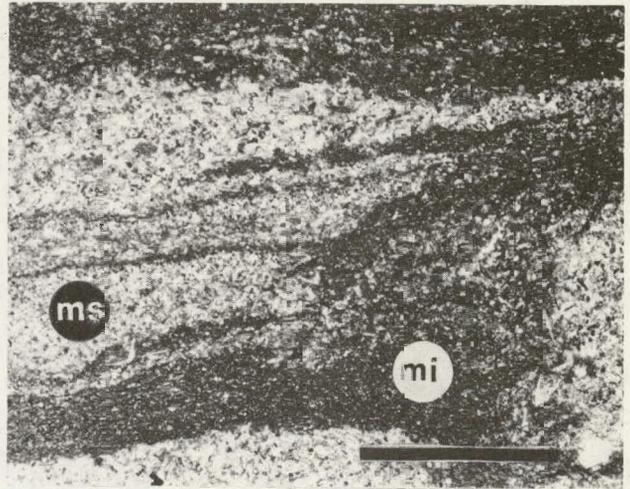
E. Plusieurs petits cylindres de calcaire soumis à l'essai ASTM C-586 ont présenté, sur leur surface de même qu'à l'intérieur de fissures, des dépôts de gels siliceux caractéristiques de la réaction alcalis-silice. Le cylindre de gauche a été obtenu parallèlement à la stratification du calcaire alors que celui de droite a été prélevé perpendiculairement à celle-ci. On remarque que les gels ont tendance à se présenter le long de plans de microfissures parallèles à la stratification. (Prisme de gauche: Faciès II, Prisme de droite: faciès III; échelle 1cm).

F. Micrographie prise au microscope électronique à balayage et spectre d'analyse chimique en dispersion d'énergie des rayons X montrant la texture et la composition chimique des dépôts de gel s'étant formés à la surface d'un cylindre de roche, après un an de trempage dans une solution de NaOH 1N. Ces gels contiennent silicium, calcium et sodium, alors que l'or et le palladium correspondent au recouvrement métallique déposé sur les échantillons avant leur examen au MEB. (Faciès II; échelle 100 micromètres)

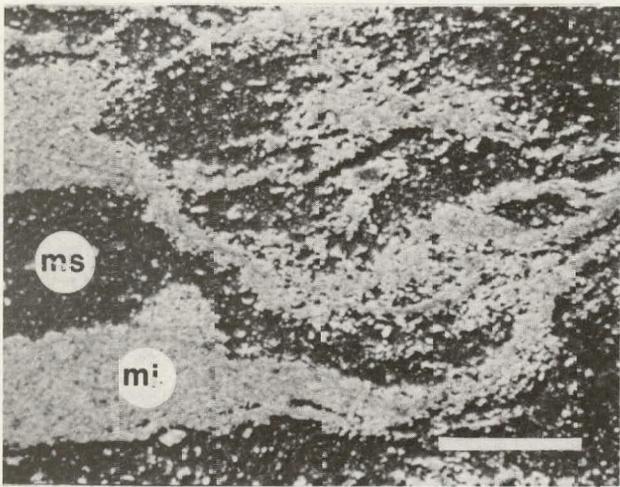
Figure 4 Pétrographie des calcaires de la région de Québec.



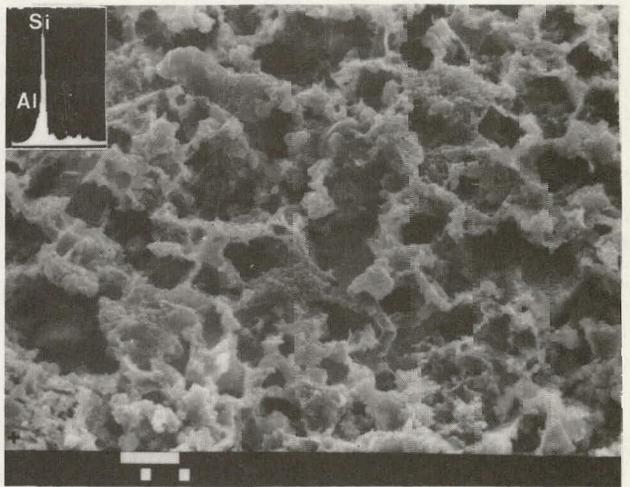
A



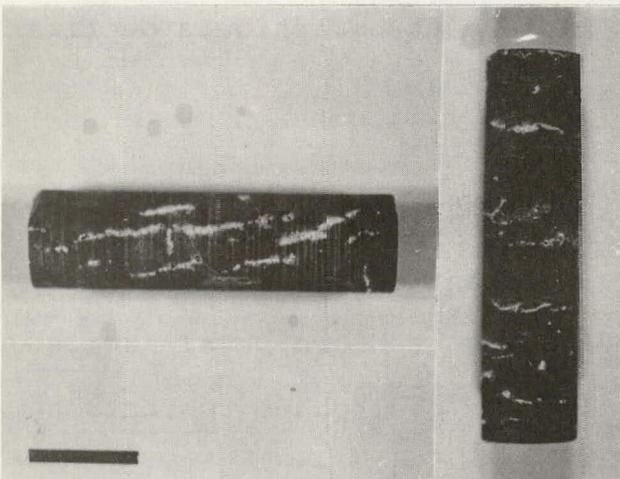
B



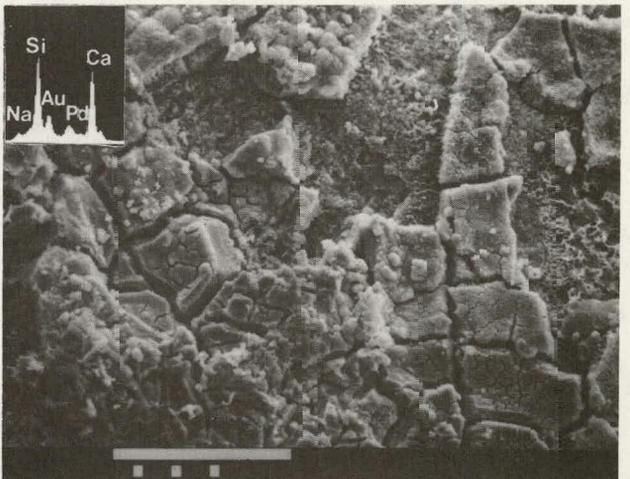
C



D



E



F

Figure 4

présentent une texture massive très typique, une cassure de type conchoïdale et une composition chimique caractérisée par un contenu en résidus insolubles variant entre 10 et 15%. Ils contiennent peu d'éléments siliclastiques. Les lits de ces calcaires sont généralement peu abondants et sont dispersés de façon plutôt aléatoire entre les lits des calcaires du faciès II. De plus, ils forment une séquence continue d'environ 35 mètres dans une carrière.

### III.2 ESSAIS DE LABORATOIRE SUR LES ECHANTILLONS DE CARRIERES

#### III.2.1 Essais physico-mécaniques

Les essais suivants ont été effectués sur l'ensemble des échantillons-composites: Nombre Pétrographique (BNQ 2560-900), Densité Brute et Absorption (BNQ 2560-067), Essai Los Angeles (BNQ 2560-400), Essai Micro-Deval Humide québécois (BNQ 2560-070), Essai de Durabilité MgSO<sub>4</sub> (BNQ 2560-450) (Gilbert et al. 1981, Aitcin et al. 1983). Les résultats de ces essais, regroupés en fonction des trois faciès pétrographiques décrits précédemment, apparaissent au tableau 1.

De par leur nature grenue, associée à un important contenu fossilifère, les roches du faciès I offrent un comportement marginal lors de deux essais: Los Angeles et Micro-Deval humide. Les propriétés physiques et mécaniques de ces roches rencontrent

toutefois les exigences spécifiées dans le cahier des Charges et devis du ministère des Transports en ce qui regarde les granulats de sous-fondations et fondations (voir tableau 2), ainsi que pour le béton de ciment et le béton bitumineux, à l'exception des classes 1A et 1B de cette dernière catégorie (voir tableau 3). La perte moyenne mesurée à l'essai Los Angeles est cependant légèrement supérieure aux exigences des granulats pour béton de ciment et béton bitumineux. Ces calcaires correspondent à la classe "calcaire cristallin" de l'essai du Nombre Pétrographique (quoiqu'il ne s'agisse pas de véritables calcaires cristallins au sens pétrographique et géologique du terme), et présentent un nombre pétrographique moyen de 138 (écart type de 12).

Tableau 1 Compilation statistique des résultats des essais de contrôle de la qualité globale des échantillons en fonction des trois principaux faciès pétrographiques reconnus dans la séquence de calcaires régionaux.

ESSAIS	FACIES					
	I		II		III	
	moy.	é.t.	moy.	é.t.	moy.	é.t.
Nb. pétrographique	138 (10)*	12.0	114 (59)	7.0	110 (13)	5.7
Durabilité MgSO <sub>4</sub>	3.5 (11)	2.4	1.7 (59)	1.3	0.75 (13)	0.28
Densité relative	2.65 (10)	0.01	2.66 (59)	0.04	2.67 (13)	0.01
Los Angeles	36.1 (10)	5.8	21.0 (59)	2.8	19.8 (13)	0.75
% Absorption	0.65 (10)	0.10	0.66 (59)	0.6	0.52 (13)	0.11
Micro Deval Humide	16.4 (11)	3.4	12.4 (57)	3.4	10.2 (13)	1.8

\* Le nombre d'échantillons testés apparait entre parenthèses.

Tableau 2 Norme sur les propriétés physiques et mécaniques des granulats pour infrastructure, sous-fondation et fondation (Tiré du cahier des charges et devis généraux du Ministère des Transports).

Au moins 95% des résultats des essais effectués par un ou des laboratoires répondent aux spécifications suivantes.

ESSAIS		CLASSE A et C	FONDATAIONS	
			inférieure	supérieure
Nombre pétrographique	max.	400	300	200
Durabilité MgSO <sub>4</sub>	% max.	35	25	20
Los Angeles	% max.	50	50	50
Micro-Deval	% max.	45	36	33
Fragmentation	% min.		50	50
Matières organiques	% max.	0,8	0,8	0,8

Nombre pétrographique: BNQ-2560-900. "Détermination du nombre pétrographique du gros granulat". Le maximum est 175 au lieu de 200 dans le cas d'une couche de roulement non pavée.

Durabilité: BNQ-2560-450. "Granulats - Détermination de la résistance à la désagrégation par une solution de sulfate de magnésium" (cinq cycles); les pertes spécifiées s'appliquent respectivement pour le gros granulat et le granulat fin.

Los Angeles: BNQ-2560-400: "Granulats - Détermination de la résistance à l'abrasion à l'aide de l'appareil Los Angeles"; le maximum est de 32 au lieu de 50 pour une pierre concassée de carrières de calcaire.

Micro-Deval: BNQ-2560-070: "Granulats - Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil Micro-Deval"; le maximum est de 30 au lieu de 33 dans le cas d'une couche de roulement non pavée.

Fragmentation: Le pourcentage indiqué est le pourcentage en masse de particules fragmentées ayant au moins une face fracturée par concassage et retenues sur le tamis 5 mm.

Matières organiques: La norme d'essai se réfère à l'ouvrage "Technologie des granulats", page 329 (Aitcin et al., 1983).

Normes: Les normes d'essai BNQ-2560-900 et BNQ-2560-450 sont remplacées par la norme BNQ-2560-070 pour les granulats provenant de carrières de calcaire.

Tableau 3 Norme sur les propriétés physiques et mécaniques des gros granulats pour béton de ciment et béton bitumineux (Tiré du cahier des charges et devis généraux du Ministère des Transports). Au moins 95% des résultats des essais effectués par un ou des laboratoires répondent aux spécifications suivantes.

ESSAIS	CLASSES					
	1A	1B	2	3	4	5
Nombre pétrographique max.	120	120	135	150	180	250
Durabilité MgSO4 % max.	5	5	12	15	18	25
Los Angeles % max.	30	50	50	50	50	50
Micro-Deval % max.	11	16	23	26	30	36
Particules plates % max.	25	25	25	30	30	30
Particules allongées % max.	40	40	45	50	50	50
Fragmentation % min.	75	75	60	60	60	60
Particules <80 um gravier % max.	1	1	1	1	1	1
pierre concassée	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
couche de surface, trait au bit.	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Résidus insolubles % min.	10	10				

Nombre pétrographique: BNQ-2560-900. Durabilité: BNQ-2560-450.

Los Angeles: BNQ-2560-400: maximum de 32 au lieu de 50 pour une pierre concassée de carrières de calcaire.

Micro-Deval: BNQ-2560-070: maximum de 16 au lieu de 11 si Los Angeles < 19.

Particules plates et allongées: BNQ-2560-265. "Granulats - Détermination du pourcentage de particules plates et allongées"; pour les traitements de surface au bitume, le maximum est de 35, pour les particules plates.

Fragmentation: Le pourcentage est indiqué en masse de particules fragmentées ayant au moins une face fracturée par concassage et retenues sur le tamis 5 mm.

Particules passant 80 um: BNQ-2560-350. "Granulats - Détermination par lavage de la quantité de particules passant au tamis 80 um".

Gravier: Béton de ciment et couche de base d'un traitement au bitume.

Pierre concassée: Bétons de ciment, béton bitumineux et couche de base d'un traitement au bitume.

Résidu insoluble: OMT (LS613).

Normes: Normes d'essai BNQ-2560-900 et BNQ-2560-450 remplacées par BNQ-2560-070, pour les granulats provenant de carrières de calcaire.

A l'opposé, les roches du faciès III, très massives et homogènes, ont réagi de façon très uniforme aux divers essais physico-mécaniques. Un nombre pétrographique moyen de 110 (écart type de 5.7) caractérise dans leur ensemble ces roches qui appartiennent à la classe "calcaire dur" de l'essai du Nombre Pétrographique. Les propriétés physiques et mécaniques moyennes de ces roches rencontrent globalement les exigences actuelles du Cahier des charges et devis du ministère des Transports pour les granulats de sous-fondations, fondations, béton de ciment et béton bitumineux (voir tableaux 2 et 3).

Les roches du faciès II montrent des comportements semblables à ceux des calcaires du faciès III. Les faibles différences sont sans doute liées 1) à leurs caractéristiques compositionnelles et texturales plus variables, 2) à leur tendance à devenir plus schisteux en s'approchant des interlits. Elles se reflètent particulièrement sur les essais de Durabilité  $MgSO_4$  et de Micro-Deval humide, ainsi que sur une plus grande dispersion des résultats (écart type). Ces roches appartiennent à la classe "calcaire dur" ou "calcaire schisteux" de l'essai du Nombre Pétrographique, et, tout comme les roches du faciès III, possèdent des propriétés physiques et mécaniques moyennes rencontrant la plupart des exigences mentionnées aux tableaux 2 et 3, à l'exception de celles pour les granulats de classe 1A pour le béton de ciment et le béton bitumineux.

Les résultats de cette série d'essais permettent de conclure que, à quelques exceptions près, les granulats calcaires de la région de Québec présentent des comportements physico-mécaniques globalement satisfaisants.

### III.2.2 Essais d'évaluation du potentiel de réactivité alcaline

#### Essai de la Méthode Chimique (ASTM C289) et essai modifié sur résidus insolubles

La présence de calcite dans les échantillons à analyser rend les résultats de l'essai normalisé non applicables (Mielenz & Benton 1958, Bérard & Roux 1986). L'essai modifié proposé par Bérard & Roux a été appliqué sur les résidus insolubles des calcaires obtenus après élimination des carbonates à l'aide d'HCl concentré (12N). Les résultats indiquent que ces résidus sont chimiquement instables dans des solutions basiques et alcalines (voir figure 5), tout comme dans le cas de calcaires de la région de Trois-Rivières (Bérard & Roux 1986, Houde 1986). Cependant, ces résultats sur résidus insolubles doivent être interprétés avec beaucoup de prudence puisqu'aucune étude systématique n'a permis jusqu'à ce jour de les corrélérer avec le comportement réel des granulats (évalué par des essais plus poussés en laboratoire ou d'après leur comportement dans des structures de béton soumises aux conditions naturelles d'exposition). De

plus, l'interprétation des résultats de cet essai, telle qu'effectuée présentement, ne tient pas compte de la proportion de résidus insolubles dans la roche, facteur qui, nous le verrons plus loin, joue un rôle important dans le comportement de ces granulats en milieu alcalin.

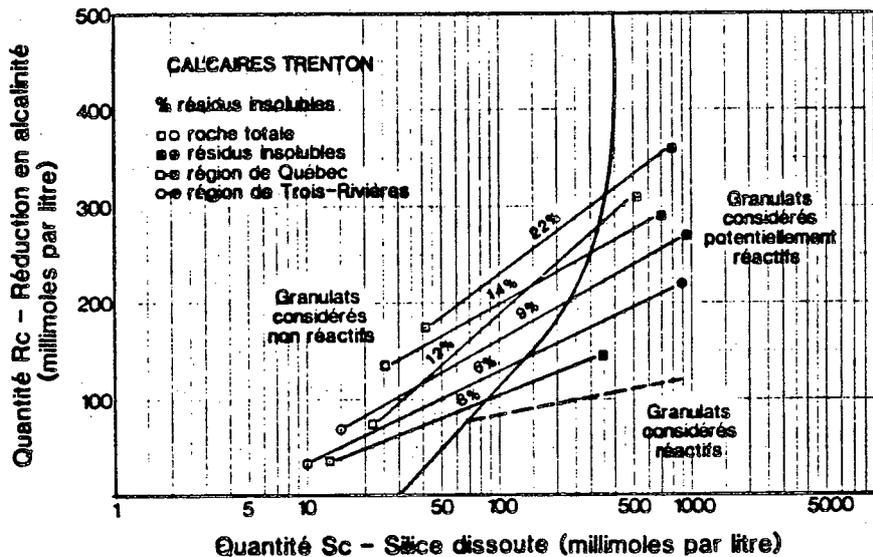


Figure 5 Résultats de l'essai de la Méthode Chimique (ASTM C289) et de la version modifiée (sur résidus insolubles).

En fait, un granulat calcaire dont les résidus insolubles se montrent inertes à l'essai C289 modifié ne devrait présenter aucun risque de réactivité alcalis-silice dans le béton, encore faut-il s'assurer au préalable, par analyse chimique ou diffraction des rayons X, que les résidus insolubles ne contiennent pas de phases minérales susceptibles de fausser les résultats de l'essai (Mielenz & Benton 1958, Bérubé et al. 1987). Un résultat contraire nécessite toutefois une vérification par d'autres

essais, tel que recommandé par la norme ACNOR CAN3-A23.2-M77 (ACNOR 1986).

#### Essai du Cylindre de Roche (ASTM C586)

Des cylindres de roche ont été prélevés à partir des échantillons-blocs. Après un comportement stable durant les 21 à 24 premières semaines dans une solution de NaOH 1N (voir figure 6), la plupart des cylindres appartenant aux faciès II et III ont commencé à se dilater, mais à des taux différents. Des microfissures et des dépôts de gel silico-calco-alcalins sont apparus sur plusieurs d'entre eux, principalement parallèles à la stratification (voir figure 4E). Les résultats indiquent des expansions moyennes plus fortes pour les cylindres de roche contenant de grandes quantités de microfaciès siliceux-argileux décrit précédemment. Si l'on considère les expansions supérieures à 0,1% comme indicatives d'un potentiel de réactivité chimique délétère (ASTM Standards C586-81), les roches appartenant aux faciès II-2 et III pourraient être considérées comme instables dans un environnement basique et alcalin (voir tableau 4). La présence de gel sur les échantillons dénote également une telle instabilité (Supplément No.2-1986 ACNOR CAN3-A23.2.M77). On s'entend néanmoins pour dire que de tels résultats doivent être confirmés par d'autres essais comme l'examen pétrographique et/ou des essais à plus long terme tels que l'essai de la Barre de Mortier (ASTM C227) et/ou du Prisme de Béton (ACNOR CAN3-A23.2-14A).

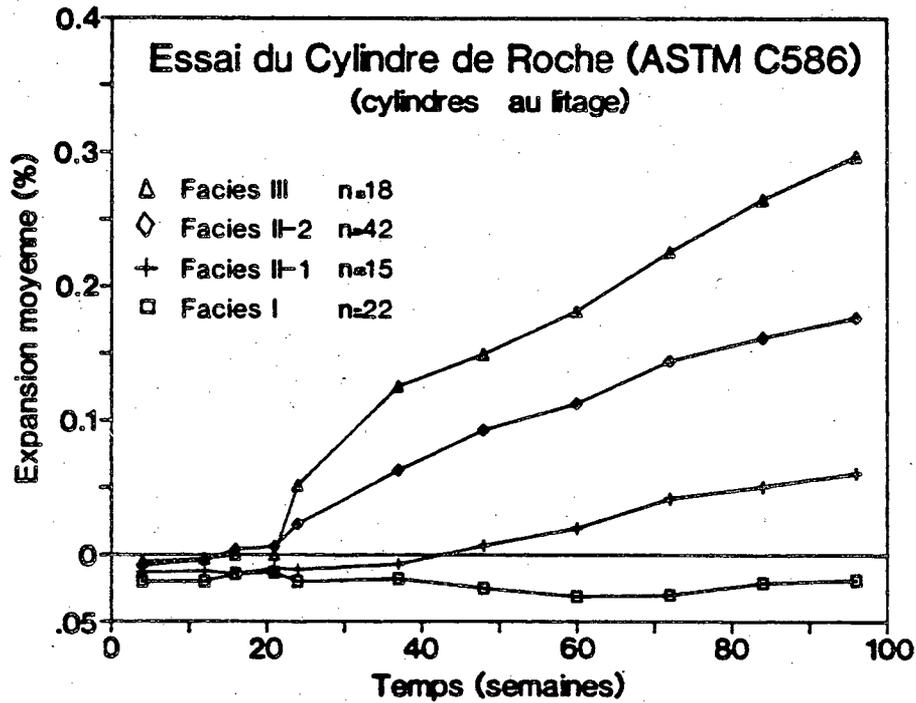


Figure 6 Résultats de l'essai du Cylindre de Roche (ASTM C586).

Tableau 4 Expansion des cylindres de roche (ASTM C586).

FACIES PETROGRAPHIQUE	NOMBRE DE CYLINDRES	TEMPS ANNEES	% EXPANSION		% DE CYL. AVEC EXPANSION >0.1%
			moy.	é.t.	
I	22	1 (2)	-0.025 (-0.018)	0.021 (0.026)	0 (0)
II-1	15	1 (2)	0.006 (0.061)	0.032 (0.078)	0 (20)
II-2	42	1 (2)	0.095 (0.179)	0.085 (0.142)	50 (74)
III	18	1 (2)	0.149 (0.295)	0.120 (0.177)	78 (89)

## Essai de la Barre de Mortier (ASTM C227)

Préparées à partir des granulats calcaires (échantillons-composites) et d'un ciment normal (type 10; 1.20% équi. Na O), les barres de mortier ont été conservées à 38 ° C (H.R. >95%) et mesurées périodiquement sur une période de 2 années. Les expansions observées (voir figure 7, tableau 5) peuvent être considérées marginales par rapport aux limites spécifiées par l'ASTM (0,05% et 0,1% à 3 mois et à 6 mois, respectivement). Cependant, de telles limites sont considérées comme irréalistes pour certains types de granulats réactifs (Grattan-Bellew 1981). Des microfissures ainsi que de petits dépôts de gel siliceux ont été observés sur plusieurs barres ayant montré une expansion supérieure à 0,05%, comportement qui a également été observé ailleurs (Duncan et al. 1973, Hobbs 1982, ACNOR Supplement No. 2-1986).

Certaines expériences récentes effectuées à Ontario Hydro par Doug Hooton sont venues jeter une douche d'eau froide sur la fiabilité de l'essai C227, tel qu'il est présentement pratiqué. En effet, ce chercheur a effectué cet essai sur deux types de matériaux réactifs, le pyrex (recommandé par la norme ASTM C441 pour l'évaluation de l'efficacité des ajouts cimentaires dans le béton), et le calcaire siliceux de la Carrière Spratt d'Ottawa, et ce, en utilisant une dizaine de contenants distincts. Dans le cas du pyrex, les contenants qui favorisaient les plus fortes expansions étaient entre autres le plus récent

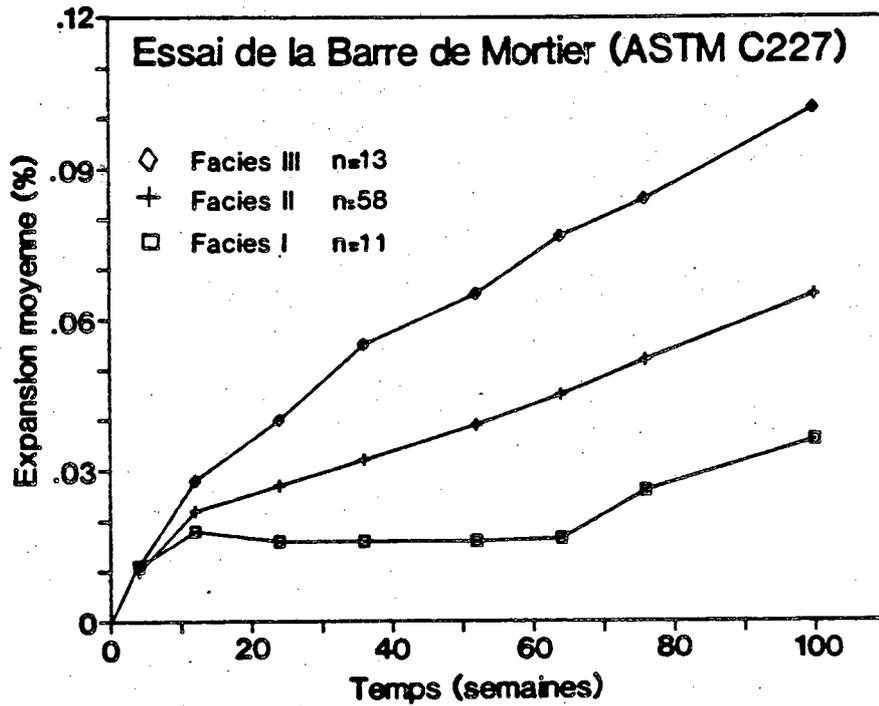


Figure 7 Résultats de l'essai de la Barre de Mortier (ASTM C227).

Tableau 5 Expansion de barres de mortier (ASTM C227).

FACIES PETROGRAPHIQUE	NOMBRE D'ESSAIS	TEMPS ANNEES	% EXPANSION		% DE BARRES AVEC EXPANSION	
			moy.	é. t.	>0.05%	>0.1%
I	11	1 (2)	0.016 (0.036)	0.017 (0.034)	9 (9)	0 (9)
II	58	1 (2)	0.039 (0.065)	0.025 (0.031)	26 (66)	7 (16)
III	13	1 (2)	0.065 (0.102)	0.021 (0.026)	77 (100)	8 (54)

contenant normalisé de l'ASTM et celui utilisé habituellement par Ontario Hydro (Hooton 1987). Les contenants employés dans le cadre du présent travail sur la région de Québec offraient les valeurs d'expansion les plus faibles avec ce matériel (Hooton 1987).

Cependant, lorsque Doug Hooton reprit les essais avec cette fois un vrai granulats, le calcaire siliceux de la Carrière Spratt, la situation fût tout à fait inversée: les contenants auxquels furent précédemment associées les plus fortes expansions (avec le pyrex) fournirent alors les plus faibles valeurs (ceci incluant le plus récent contenant normalisé de l'ASTM; Hooton, comm. pers.), et vice versa. En fait, moins de la moitié des contenants testés suggéraient comme délétère ce calcaire, pourtant reconnu comme très réactif dans le béton.

Ayant mesuré et constaté que le pH et la concentration en alcalis de la solution présente dans le fond des contenants étaient, pour un contenant donné, semblables pour les deux séries d'expériences, et qu'ils étaient plus élevés pour ceux présentant les plus fortes expansions avec le pyrex mais les plus faibles allongements avec le calcaire Spratt, Hooton (comm. pers.) fournit les explications suivantes:

1) les contenants, qui ont démontré les plus fortes expansions avec le pyrex, mais les plus faibles allongements avec le calcaire réactif, sont ceux dans lesquels règnent des conditions plus "sévères" d'humidité (avec papiers buvards). Ces conditions favorisent en effet un plus fort égoutement des barres, à preuve, les pH et les concentrations en alcalis plus élevées de la solution dans le fond des contenants, et ce, aussi bien dans le cas des essais réalisés avec le pyrex (Hooton 1987) que pour ceux effectués avec le calcaire réactif (Hooton, comm. pers.).

2) Dans le cas du pyrex, ces conditions (papiers buvards dans les contenants) auraient somme toute un effet bénéfique (expansions plus grandes), car le lessivage des barres n'aurait que peu d'effet sur la chimie de la solution interstitielle: le pyrex contient en effet de très fortes quantités d'alcalis (5.7% de Na O, Bérubé et al. 1987a),  
alcalis qu'il peut libérer à mesure qu'il réagit, pour ainsi garder le pH de la solution interstitielle à un niveau élevé. Si un pH élevé promeut les réactions alcalines, une humidité plus élevée favorise pour sa part une pression de gonflement plus grande des gels hydrophyles produits par les réactions.

3) Dans le cas où un granulats réactif "naturel" est plutôt utilisé, l'abondance d'humidité entraîne le lessivage des

alcalis de la solution interstitielle du mortier, alcalis que le granulat ne peut renouveler, provoquant ainsi une chute du pH et réduisant d'autant les réactions et les expansions, de sorte que des conditions moins "sévères" d'humidité semblent préférables (contenants sans buvard). D'ailleurs, les limites d'expansion préconisées par l'ASTM pour l'Essai de la Barre de Mortier C227 ont été mises au point à partir d'essais effectués sur des granulats naturels réactifs testés dans des contenants sans buvard (Hooton, comm. pers.).

Tout ceci indique donc qu'il y a un urgent besoin de "normaliser" les conditions expérimentales de l'essai d'un laboratoire à un autre, en utilisant par exemple toujours le même type de contenant, le même ciment, les mêmes granulométries de pierre, en contrôlant le rapport eau/ciment plutôt que l'étalement, en ajoutant au mélange de l'hydroxyde de sodium (NaOH) de façon à rehausser à 1.25% (équiv. Na O) la teneur en alcalis du mélange par rapport au ciment, tel qu'il est maintenant recommandé par l'Association Canadienne de normalisation (ACNOR, Supplement no.2-1986), en employant les mêmes méthodes de fabrication des barres, etc.

Dans le cas des essais effectués sur les calcaires de la région de Québec, avec des contenants ayant prouvés être efficaces pour les granulats naturels (i.e sans buvard), les résultats

démontrent des comportements différents pour les trois faciès pétrographiques décrits précédemment, et indiquent que les roches formées d'une quantité élevée de microfaciès siliceux-argileux peuvent offrir un comportement expansif lent, quoique modeste selon les essais effectués en milieu alcalin. Des expansions supérieures auraient sans doute été atteintes en augmentant à 1.25% (équiv. Na O) la teneur en alcalis du mélange par l'ajout de NaOH, comme il est maintenant recommandé par l'Association Canadienne de normalisation (ACNOR, Supplement No.2-1986) pour les granulats calcaires contenant du chert, donc susceptibles de réactivité alcalis-silice. D'autres essais sont actuellement en cours pour vérifier cette hypothèse.

#### Essai du Prisme de Béton (ACNOR CAN3-A23.2-14A)

Pour ce test, des prismes de béton (75mm x 100mm x 400mm) ont été confectionnés avec un ciment type 10 à haute teneur en alcalis (1.20% équiv. Na O), un sable local non réactif (selon les normes ASTM C289 et C227), de composition granitique, et les granulats calcaires (échantillons-composites). Ces prismes ont été conservés dans une chambre humide ("fog room") maintenue à 23 C. Aucune valeur d'expansion supérieure aux limites proposées par la norme canadienne (ACNOR CAN3 A23.2-M77, App.B3.5) n'a été observée, même après plus de 2.5 ans, ce qui peut suggérer que les granulats sont non expansifs ou à tout le moins que le processus engagé est très lent. Cependant, des études récentes

effectuées au Laboratoire Central indiquent que l'abondance d'eau disponible dans la chambre humide contribue à abaisser la concentration en ions alcalis dans la solution interstitielle du béton, éliminant ainsi l'expansion potentielle associable au phénomène de réactivité alcalis-granulats (voir tableau 6). Des essais ont donc été repris avec des granulats de la région de Québec (Faciès II, composant majeur de la séquence stratigraphique régionale), et des granulats réactifs reconnus de la région de Trois-Rivières (ciment utilisé: 1.08% équiv. Na O) (voir tableau 6). Des expansions non négligeables, allant même en s'accroissant avec le temps, ont alors été observées sur les prismes fabriqués avec des granulats calcaires de Québec, mais celles-ci sont nettement inférieures aux expansions obtenues avec les calcaires de Trois-Rivières. Il est toutefois probable que des expansions supérieures à 0.04% à un an auraient été observées (avec les granulats de Québec) en augmentant à 1.25% (équivalent Na O) la teneur en alcalis du mélange par rapport au ciment, comme le recommande maintenant l'Association Canadienne de normalisation (ACNOR, Supplement No.2-1986). Les résultats d'essais effectués avec le calcaire siliceux réactif de la carrière Spratt d'Ottawa (voir tableau 6) indiquent en effet l'influence très importante de ce paramètre sur les expansions observées. D'autres essais ont été entrepris pour vérifier ce postulat pour les granulats calcaires de la région de Québec.

Tableau 6 Résultats d'essais du Prisme de Béton (ACNOR A23.2-14A) effectués avec des granulats calcaires des régions de Trois-Rivières (TR), de Québec (F2) et d'Ottawa (SP). Chaque valeur correspond à un pourcentage moyen d'expansion calculé à partir des résultats obtenus sur un groupe de trois prismes.

Ciments utilisés: 1.08% éq. Na<sub>2</sub>O pour TR et F2  
 1.03% éq. Na<sub>2</sub>O pour SPa et b  
 0.66% éq. Na<sub>2</sub>O pour SPc

ECHANTILLON	EXPANSION (%); TEMPS (semaines)					
	4s.	12s.	24s.	48s.	64s.	78s.
TR C.H. 23°C Tablette <sup>1</sup>	0.017	0.011	0.017	0.014	0.010	0.033
TR C.H. 23°C Chaudière <sup>2</sup>	0.017	0.008	0.018	0.024	0.052	0.099
TR 38°C Chaudière <sup>3</sup>	0.014	0.014	0.085	0.164	0.188	0.207
TR Na+ 38°C Chaudière <sup>4</sup>	0.023	0.097	0.221	0.311	0.303	0.324
F2 38°C Chaudière <sup>3</sup>	--	0.023	0.034	0.033	0.048	0.062
SPa Na+ 38°C Chaudière <sup>4</sup>	0.005	0.069	0.185	0.274	---	---
SPb 38°C Chaudière <sup>3</sup>	0.002	0.025	0.110	0.191	---	---
SPc 38°C Chaudière <sup>3</sup>	0.006	0.017	0.007	0.008	---	---

1. Prismes conservés sur une tablette en chambre humide (23°C).
2. Prismes conservés dans une chaudière hermétique, en chambre humide (23°C).
3. Prismes conservés dans une chaudière hermétique, en chambre chaude (38°C).
4. Prismes conservés dans une chaudière hermétique, en chambre chaude (38°C), mais dont la teneur en alcalis du mélange a été rehaussée à 1.25% équiv. Na<sub>2</sub>O (par rapport au ciment) par ajout de NaOH.

### III.3 CONCLUSION SUR LES ESSAIS DE LABORATOIRE

L'ensemble des analyses et des essais de laboratoire ont démontré que le comportement physico-mécanique et chimique des granulats calcaires de Québec sont intimement liés à leurs caractéristiques minéralogiques, chimiques et texturales (Fournier & Bérubé 1985).

Le potentiel de réactivité alcaline de ces calcaires est principalement fonction de la nature et de l'abondance de leur résidu insoluble, lequel s'est montré instable en milieu alcalin lors de l'essai de la Méthode Chimique modifiée. Les résultats des essais du Cylindre de Roche (ASTM C586) et de la Barre de Mortier (ASTM C227) démontrent en effet que certains de ces calcaires peuvent donner lieu à un comportement faiblement expansif en milieu alcalin. Les valeurs d'expansions mesurées par ce dernier essai ont toutefois été inférieures aux limites actuelles proposées dans la norme ASTM C227. D'autres essais réalisés sur la base des nouvelles exigences pour les essais du Prisme de Béton et de la Barre de Mortier (ACNOR Supplement No.2-1986 to CAN3-A23.1-M77), ainsi que le nouvel essai accéléré sur barre de mortier proposé par Oberholster & Davies (1986) sont actuellement en cours. Les résultats seront publiés ultérieurement.

#### IV. RESULTATS DES TRAVAUX SUR LES STRUCTURES DE BETON

##### IV.1 GENERALITES

L'état général de quelques 272 structures en béton du district administratif de Québec, d'une superficie de 2200 km<sup>2</sup> et limité à la rive nord du fleuve Saint-Laurent, de même que d'une quinzaine d'autres de la région voisine de Lévis (rive sud), a été évalué en deux étapes. Les composantes de chaque structures ont été caractérisées selon: 1) la présence et l'importance (superficie affectée) des principaux défauts communément rencontrés dans les structures de béton (ACI 201.1R-68, Emery et al. 1985, Manning & Bye 1983, Berissi et al. 1975), et 2) les conditions d'exposition auxquelles ces composantes sont soumises. En très grande partie, les structures étaient composées de viaducs ou de ponts appartenant au réseau routier de la région de Québec.

Suite à cet examen visuel détaillé, quelques 60 structures du district de Québec jugées intéressantes de par la présence et l'abondance de signes de détérioration généralement associés aux réactions alcalis-granulats (motif de fissuration polygonale, éclatement du béton, etc.) ont été échantillonnées, et ce, généralement dans une de leurs composantes les plus détériorées (trois carottes adjacentes de 100 mm de diamètre et de l'ordre de 250 mm de longueur). Des carottes ont également été prélevées, à titre comparatif, dans des composantes moins détériorées de cinq

de ces structures, ainsi que dans trois autres structures en béton de la région voisine de Lévis, fabriquées avec d'autres types de granulats. Ces dernières structures ont généralement entre 20 et 25 ans et montrent de façon caractéristique peu de signes externes de détérioration.

Les échantillons de forage ont ensuite été soumis à une série d'essais et d'analyses de laboratoire visant à évaluer leurs principales caractéristiques physiques et mécaniques: Résistance en compression (ASTM C42), Absorption d'eau et pourcentage de vides perméables (ASTM C642), Détermination des caractéristiques du réseau de vides (ASTM C457, "Modified Point Count Method"), Détermination de la teneur en chlorures (Bermann 1972). De plus, pour chaque composante échantillonnée, un examen pétrographique détaillé a été réalisé à l'aide d'un stéréomicroscope et, au besoin, d'un microscope électronique à balayage équipé d'un analyseur chimique à dispersion d'énergie des rayons X (EDXA). Cet examen a été effectué sur une carotte gardée intacte ainsi que sur celle ayant servi à l'essai de résistance en compression. Il avait pour but d'évaluer l'état général du béton et, plus particulièrement, d'y reconnaître la présence et, selon le cas, l'étendue des signes de réactivité alcalis-granulats.

En général, les dossiers du ministère des Transports ne font état que de l'année de construction des structures étudiées.

Très peu de renseignements quant aux caractéristiques des mélanges utilisés (nature et quantité de ciment, nature et granulométrie des granulats fins et grossiers, f'c spécifié, etc.), ainsi qu'à la nature et à la qualité des travaux de mise en oeuvre du béton s'y retrouvent. De tels renseignements auraient certes été fort utiles dans l'interprétation des observations effectuées. Les auteurs sont donc bien conscients de cette lacune mais considèrent que leurs observations pourront malgré tout aider l'ensemble des intervenants engagés autant dans la conception que dans la mise en oeuvre des prochains projets de construction ou de réparation de structures bétonnées, puisqu'elles reflètent l'état global actuel des structures routières de la région de Québec.

De plus, pour fins d'analyse, les observations effectuées ont été souvent regroupées en fonction de l'âge des structures examinées, plus précisément par périodes de 10 années. Il est certain que les courbes représentant la présence (i.e proportion de structures atteintes) d'un défaut en fonction de l'âge des structures ne correspondent pas nécessairement à l'évolution d'un tel défaut dans le temps. En effet, la technologie du béton ayant beaucoup évolué depuis les années 40, ces observations reflètent l'état actuel de structures construites selon des techniques et avec les matériaux usuels du temps. Cette distinction est fort importante puisqu'elle permet de concevoir, entre autres, pourquoi un défaut donné peut se retrouver plus fréquemment chez les

plus jeunes structures que chez les plus vieilles. Néanmoins, et nous le verrons plus loin, ces observations peuvent tantôt s'interpréter comme le résultat d'une évolution dans la technologie du béton (exemple: écaillage), tantôt comme la conséquence du "vieillissement" de structures ou composantes de structures soumises à des conditions sévères d'exposition (ex: exsudations, délaminations et traces de rouille).

## IV.2 RESULTATS DE L'INSPECTION VISUELLE

### IV.2.1 Etat général des structures

Le tableau 7 présente les résultats de l'inspection visuelle des structures, laquelle a surtout porté sur les principales composantes et les défauts les plus communément rencontrés sur les structures de béton (ACI 201.1R-68). Les valeurs représentent la fréquence observée de ces défauts (% des structures examinées), sans toutefois tenir compte de leur sévérité. On y retrouve toutefois une compilation de la superficie atteinte pour chacun des types de composantes. Par exemple, sur un total de 272 structures repertoriées, 73% (198) contiennent un parapet. De ce nombre, 26% (52) présentent des fissures longitudinales, 75% (148), des fissures polygonales, etc. De plus, 10% des parapets ne montrent aucun défaut, 25% montrent des défauts couvrant moins de 25% de leur surface, 35% sont détériorés sur 25% à 75% de leur surface, etc.

Tableau 7 Résultats de l'inspection visuelle des structures du district de Québec.

COMPOSANTES											
		Parapets	Trottoirs	Culées	Assises	Poutres de levage	Dalles	Poutres	Piliers	Autres	STRUCTURES
PRESENCE	%	73	29	88	42	32	96	50	53	3	100
	Nb	(198)	(79)	(239)	(114)	(87)	(261)	(136)	(144)	(8)	(272)
DEFAULT		PRESENCE DU DEFAULT									
Fissures longitudinales	%	26	34	4	1	2	18	13	9	0	51
	Nb	(52)	(27)	(9)	(1)	(2)	(46)	(17)	(13)	(0)	(140)
Fissures polygonales	%	75	38	55	14	1	17	16	22	100	78
	Nb	(148)	(30)	(131)	(16)	(1)	(44)	(21)	(32)	(8)	(213)
Ecaillage	%	30	31	24	6	0	11	5	6	13	45
	Nb	(60)	(25)	(56)	(7)	(0)	(29)	(7)	(9)	(1)	(122)
Eclatements ("pop-outs")	%	23	32	8	3	0	3	2	5	13	32
	Nb	(45)	(25)	(20)	(3)	(0)	(8)	(2)	(7)	(1)	(87)
Délaminations + rouille	%	13	6	13	4	3	14	19	14	0	40
	Nb	(26)	(5)	(30)	(4)	(3)	(37)	(26)	(20)	(0)	(109)
Armatures visibles	%	13	5	13	4	3	13	18	10	0	39
	Nb	(26)	(4)	(32)	(4)	(3)	(35)	(24)	(15)	(0)	(105)
Exsudations	%	21	14	18	3	0	23	5	4	13	43
	Nb	(42)	(11)	(44)	(3)	(0)	(61)	(7)	(5)	(1)	(118)
Superficie atteinte		% des composantes									
Aucun défaut (0%)		10	16	27	83	94	57	68	46	13	-
<25%		25	36	48	13	4	36	30	43	0	-
25 à 75%		35	36	24	3	2	6	1	9	50	-
>75%		30	12	1	1	0	1	1	2	37	-

Le tableau 8 regroupe les structures répertoriées selon leur année de construction, par périodes de dix ans. On remarque que 66% d'entre elles ont moins de 20 ans, ce qui signifie que le réseau routier de la région de Québec est relativement jeune. De façon globale, le nombre moyen de défauts de tout type affectant les structures de la région semble augmenter avec l'âge (voir figure 8), pour plafonner rapidement autour de cinq défauts par structure. Cependant, chaque type de défaut ne touche pas nécessairement plus fréquemment les plus vieilles structures (voir figure 9). En effet, les plus jeunes accusent plus souvent des fissures polygonales ainsi que des éclatements (pop outs) à leur surface, tandis que les structures plus âgées montrent plus fréquemment de l'écaillage, de la délamination et des traces de rouille, ainsi que des exsudations. Quant aux fissures longitudinales, leur fréquence d'apparition ne semble globalement pas être reliée à l'âge des structures.

#### IV.2.2 Fissuration longitudinale

On rencontre ce type de fissuration sur 51% des structures de la région. Celui-ci se retrouve particulièrement sur les trottoirs (34%, voir figure 11A) et les parapets (26%), mais également, dans une plus faible proportion, sur les dalles (18%) et les poutres (13%) (voir tableau 7). Les fissures sont généralement fines ou moyennes (< 1mm), pénètrent rarement plus de 25mm

dans les parapets et les trottoirs, tout en demeurant généralement superficielles au niveau des poutres. Dans les dalles, leur profondeur de pénétration est fort variable; les fissures traversent parfois même toute leur épaisseur dans des cas de détérioration avancée. Des fissures longitudinales apparaissent également sur un certain nombre de poutres préfabriquées et/ou armées; les poutres externes exposées aux intempéries ainsi que celles soumises à des eaux de drainage mal canalisées sont visiblement les plus affectées.

Tableau 8 Répartition des défauts en fonction de l'année de construction des structures examinées.

PERIODE DE CONSTRUCTION	STRUCTURES	DEFAUTS						
		Fissuration longitudinale	Fissuration polygonale	Ecaillage	Pop outs	Delamination & tr. de rouille	Exsudations	
<1955	%	7	53	68	68	26	58	68
	Nb	(19)	(10)	(13)	(13)	(5)	(11)	(13)
56-65	%	13	57	74	77	20	63	49
	Nb	(35)	(20)	(26)	(27)	(7)	(22)	(17)
66-75	%	44	58	84	36	35	42	46
	Nb	(119)	(69)	(100)	(43)	(42)	(50)	(55)
76-85	%	22	41	79	33	31	16	25
	Nb	(61)	(25)	(48)	(20)	(19)	(10)	(15)
Inconnue	%	14	42	68	50	37	42	47
	Nb	(38)	(16)	(26)	(19)	(14)	(16)	(18)
Total	%	100	51	78	45	32	40	43
	Nb	(272)	(140)	(213)	(122)	(87)	(109)	(118)

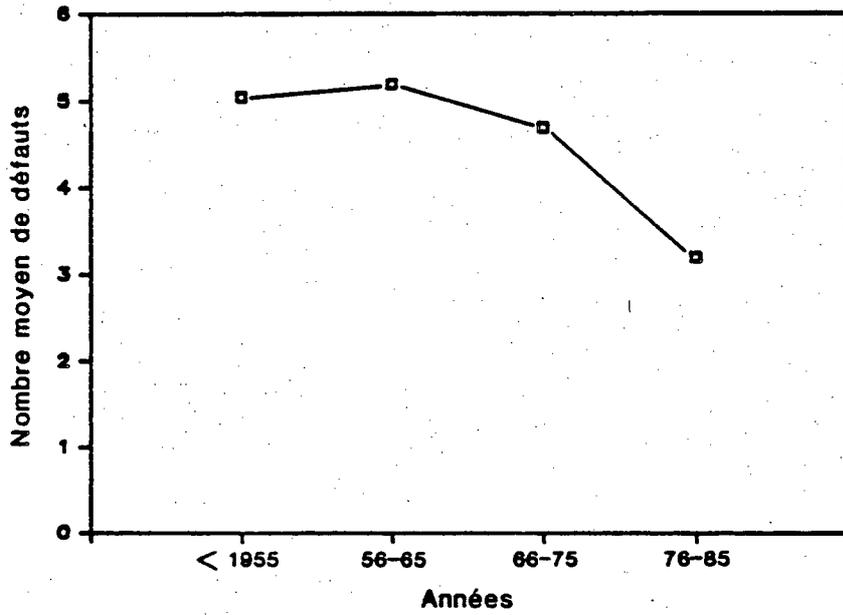


Figure 8 Nombre moyen de défauts affectant les structures en béton de la région en fonction de l'année de construction.

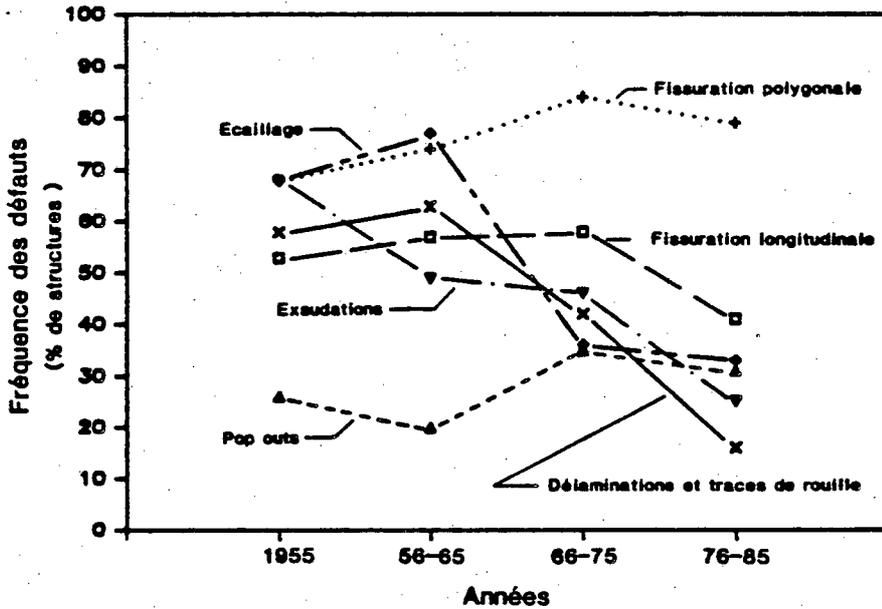


Figure 9 Fréquence des défauts affectant les structures de la région en fonction de l'année de construction.

Les structures les plus âgées présentent plus de fissures longitudinales que les jeunes en ce qui regarde les dalles et les poutres, alors que l'inverse semble se produire quant aux parapets et aux trottoirs (voir figure 10A). Ces fissures apparaissent souvent immédiatement au dessus d'éléments longitudinaux (fils électriques, tuyaux de drainage, armatures, etc.).

#### IV.2.3 Fissuration polygonale

Il s'agit du défaut le plus fréquemment rencontré sur les structures du district de Québec, puisqu'il se présente dans 78% des cas sur au moins une de leurs composantes. Il touche principalement, et dans des proportions importantes, les parapets (75%), trottoirs (38%) et murs de culées (55%) (voir tableau 7). Les fissures sont généralement fines (< 1mm), d'apparence humide, et forment en surface un réseau de polygones irréguliers (voir figures 11B et 11C). On les distingue facilement du motif de fissuration rectangulaire témoignant de la proximité d'armatures et fréquemment rencontré sur les murs "exposés" de culées et sous les dalles.

Cette fissuration polygonale semble globalement affecter plus fréquemment les plus récentes structures (voir figure 9). En fait, on la retrouve en moyenne plus fréquemment sur les parapets, les murs de culées et les piliers des plus jeunes structures, mais, à l'opposé, plus souvent sur les trottoirs, les dal-

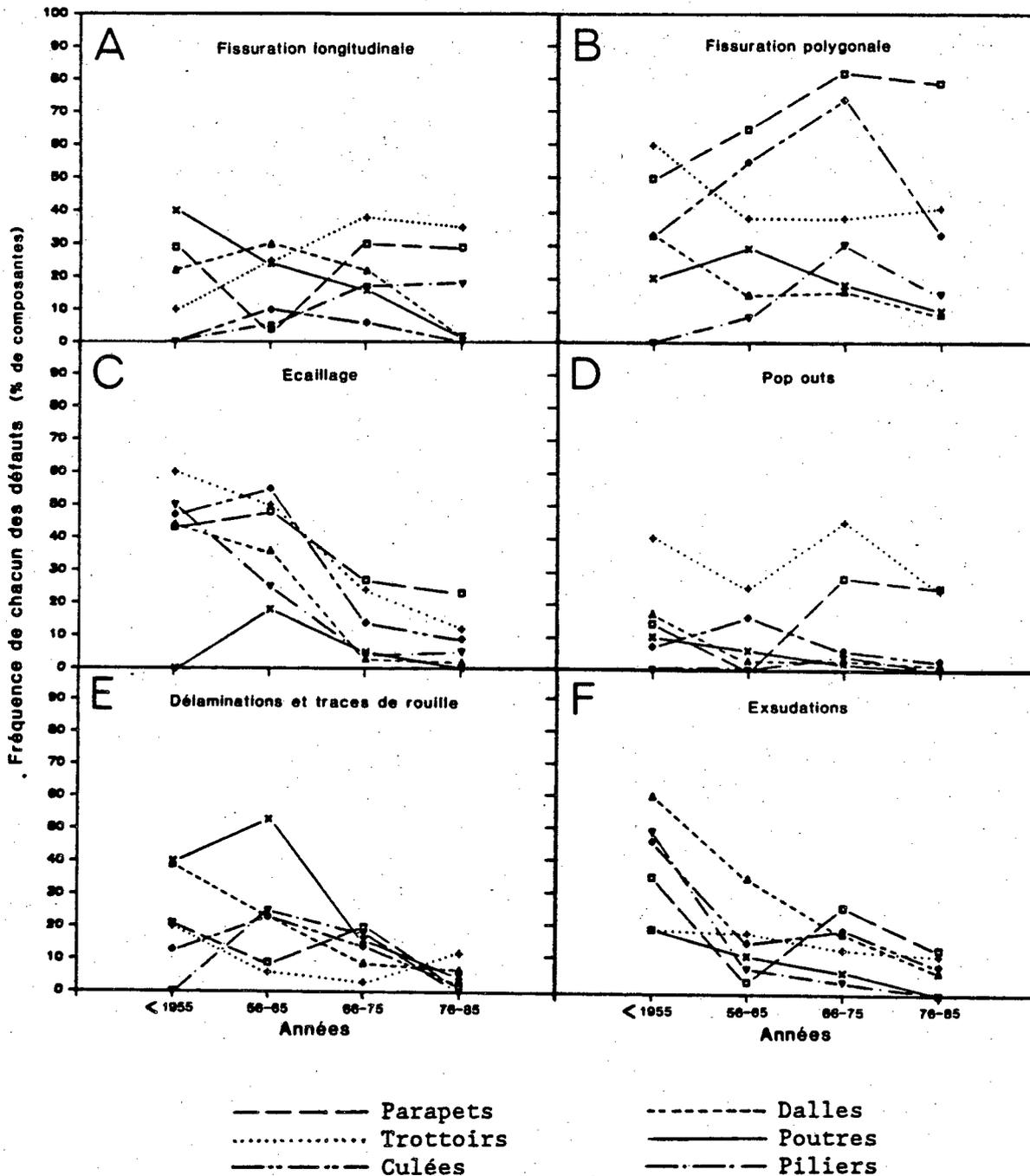


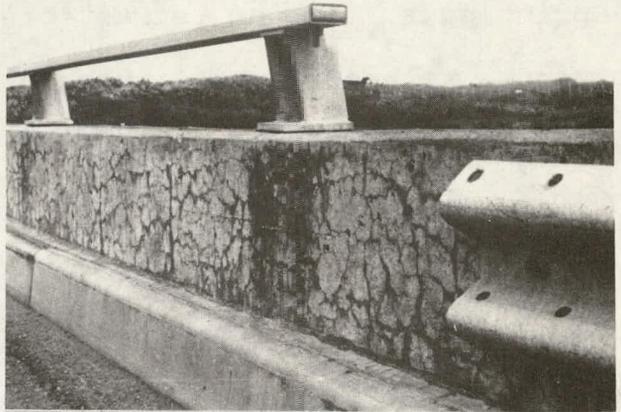
Figure 10 Fréquence des défauts apparaissant sur les différentes composantes des structures de la région en fonction de l'année de construction.

- A. Fissuration longitudinale et diagonale dans le trottoir d'une structure agée de 17 ans.
- B. Motif de fissuration polygonale sur le parapet d'une structure de béton agée de 15 ans. Les fissures présentent un aspect humide caractéristique.
- C. Motif de fissuration polygonale sur la base d'une structure de béton agée de 20 ans. Les fissures présentent un aspect humide caractéristique.
- D. Eclatements ("pop outs") à la surface d'un trottoir impliquant des particules de calcaire schisteux provenant de la séquence stratigraphique de la région de Québec (Formation de Neuville).
- E. Délamination associée à un système de drainage déficient sous la dalle d'une structure agée de 20 ans.
- F. Exsudations associées à des fissures s'étant développées sous la dalle d'une structure de béton.

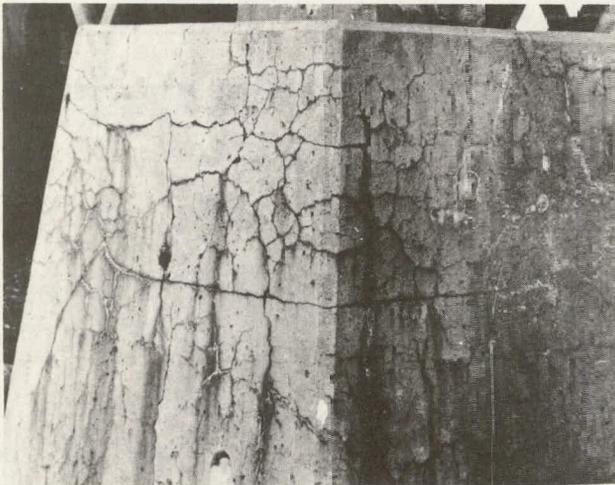
Figure 11 Inspection visuelle des structures de béton de la région de Québec.



A



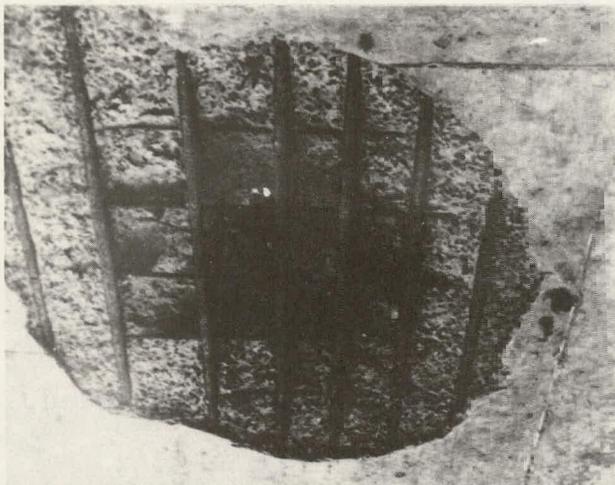
B



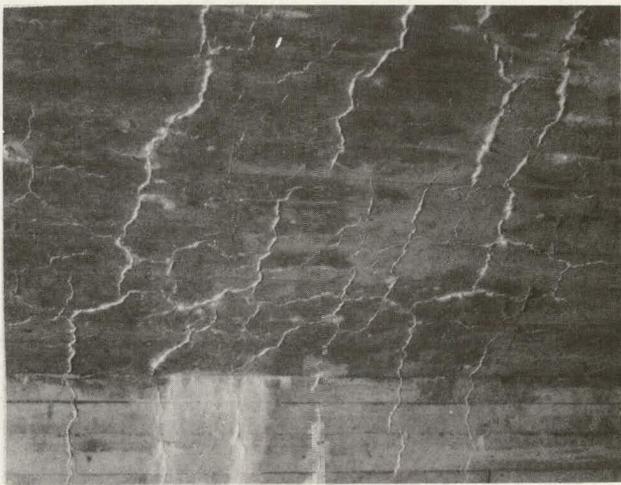
C



D



E



F

Figure 11

les et les poutres des plus vieilles (voir figure 10B). Un tel réseau de fissures est généralement attribué à deux processus principaux, 1) un retrait près de la surface, et 2) des changements volumétriques internes et expansifs (réactions alcalis-granulats, réactions aux sulfates, gel, etc.) (ACI 201.1 R-4).

#### IV.2.4 Ecaillage

L'écaillage est généralement le résultat de cycles répétés de gel et de dégel sur un béton saturé d'eau et présentant un réseau d'air plus ou moins déficient. L'application de sels de déglacage sur les structures bétonnées favorise ce phénomène (Manning & Bye 1983, Emery et al. 1985). Dans la région de Québec, 45% des structures présentent de l'écaillage, ce phénomène étant surtout concentré sur les composantes soumises aux conditions plus sévères d'exposition, soit les trottoirs (31%), les parapets (30%), et les faces externes des culées (24%) (voir tableau 7).

La proportion de structures montrant de l'écaillage augmente en moyenne avec le temps (voir figure 9), et ce, quelle que soit la composante examinée (voir figure 10C). Les résultats de l'examen d'un certain nombre de carottes de béton ajoutés à l'inspection visuelle des composantes à partir desquelles ces échantillons ont été prélevés, indiquent que l'écaillage est principalement fonction des caractéristiques du réseau d'air du béton,

ainsi que des conditions d'exposition affectant ces composantes (voir section IV.4.2).

#### IV.2.5 Eclatements ("pop-outs")

Les "pop-outs" sont des dépressions peu profondes occasionnées par l'éclatement de la surface du béton sous l'influence de pressions internes (Manning & Bye 1983) et souvent associés à la présence de granulats gélifs ou réactifs près de la surface. Ce phénomène touche 32% des structures de la région de Québec, et ce, principalement au niveau des trottoirs et des parapets (voir tableau 7, figure 11D), composantes soumises aux conditions les plus sévères d'exposition.

La proportion des composantes atteintes par des éclatements est légèrement plus élevée depuis les dernières décades (voir figures 9 et 10D). Il s'agit d'un phénomène apparaissant généralement au cours des premières années d'exposition du béton. A vrai dire, seule la sévérité avec laquelle une composante sera atteinte par ce défaut varie vraisemblablement avec le temps. Les variations dans la fréquence d'apparition de ce phénomène sont sans doute attribuables aux différences de composition des calcaires tout le long de la séquence stratigraphique régionale et dans chacune des carrières de la région, (particulièrement en ce qui a trait aux particules de calcaires schisteux), ainsi qu'aux conditions d'exposition des structures examinées. De

plus, l'utilisation de plus grosses particules de granulats dans les structures plus âgées pourrait fort bien expliquer en partie la plus faible fréquence d'éclatements observées sur celles-ci.

#### IV.2.6 Délaminations et traces de rouille

La corrosion des armatures dans le béton ainsi que les phénomènes qui y sont associés (délamination + traces de rouille) ont fait l'objet d'une grande quantité d'études depuis les deux dernières décennies (Slater 1983). Dans la région de Québec, 40% des structures montrent simultanément ces deux phénomènes sur au moins une de leurs composantes (voir tableau 7). Les poutres (19%) sont les plus fréquemment touchées, particulièrement celles soumises aux intempéries (faces extérieures) ou exposées à des eaux d'écoulement mal canalisées par des systèmes de drainage déficients. Les autres composantes armées exposées, soit les parapets (13%), les culées (13%), les dalles (14%) et les piliers (14%), sont moins affectées par ce défaut (voir tableau 7).

Une tendance à l'augmentation avec l'âge de la proportion de composantes de structures bétonnées atteintes de ces défauts n'est évidente qu'au niveau des dalles et des poutres et, jusqu'à un certain point, sur les murs de culées (voir figure 10E). Des systèmes de drainage inadéquats sont souvent à la source de ces problèmes (voir figure 11E ainsi que la section IV.4.3).

#### IV.2.7 Exsudations

La présence d'exsudations à la surface d'une composante de béton est le signe irréfutable d'une circulation d'eau à l'intérieur de celle-ci (Deloye et al. 1983). 43% des structures de la région de Québec montrent des exsudations sur au moins une de leurs composantes (voir tableau 7). Parmi celles-ci, les dalles (23%), les parapets (21%) et les culées (18%) sont les plus fréquemment touchées (voir tableau 7 et la figure 11F).

De façon très générale, on remarque une tendance à l'accroissement de la fréquence d'apparition de ce défaut en fonction de l'âge pour l'ensemble des composantes examinées (voir figures 9 et 10F). Cette tendance pourrait globalement être interprétée comme le reflet du vieillissement des structures, c'est-à-dire qu'avec le temps, il est de plus en plus probable qu'au moins une composante soit fissurée, surtout lorsqu'il s'agit de composantes soumises à des conditions sévères d'exposition, ce qui a pour effet d'augmenter la circulation d'eau et, conséquemment, les risques de voir apparaître des exsudations à la surface de celles-ci.

#### IV.3 CONCLUSION SUR L'INSPECTION VISUELLE

L'inspection visuelle des structures de la région de Québec construites avec des granulats calcaires locaux, nous a permis

d'y reconnaître, dans l'ensemble, la panoplie presque complète des défauts relatifs à la durabilité des bétons (ACI 201.1R-68). Malgré que la presque totalité des structures répertoriées soit atteinte d'au moins un défaut, la sévérité des détériorations doit être actuellement considérée comme globalement modeste, les défauts n'affectant, de façon très générale, que les composantes (ou les sections de celles-ci) soumises à des conditions sévères d'exposition (cycles de mouillage et séchage et de gel et dégel, application de sels de déglacage).

Le nombre moyen de défauts (quel qu'en soit la nature) affectant les structures en béton augmente en moyenne avec leur âge. Cette conclusion ne s'applique toutefois pas à tous les types de défauts. En effet, si on retrouve en moyenne une plus forte proportion de vieilles structures atteintes d'écaillage, de délaminations et de traces de rouille, de même que d'exsudations (voir figure 9), les fissures polygonales et les éclatements (pop outs) sont à l'inverse plus fréquemment observés sur les structures plus jeunes et, dans certains cas, se manifestent relativement tôt après la mise en service.

Les fissures polygonales ainsi que les éclatements sont étroitement associés au type de granulat utilisé ainsi qu'aux conditions d'exposition. En effet, l'expertise détaillée d'une quinzaine de structures de la région voisine de Lévis, construites il y a environ 25 ans avec d'autres types de granulats,

principalement des grès lithiques (grauwackes), a révélé que les composantes exposées de ces structures présentaient des défauts tels que fissures longitudinales, écaillage, délaminations, traces de rouille, et exsudations, mais peu ou pas de fissures polygonales de même que de pop-outs. Une expertise privée (Bérubé et al. 1986) a également confirmé cette observation.

#### IV.4 ANALYSES DE LABORATOIRE

Le tableau 9 expose les caractéristiques globales des 60 composantes échantillonnées, dont 25 parapets, 16 trottoirs et 12 culées. La majorité de ces composantes présentaient des fissures polygonales à leur surface (83%) et souvent des exsudations (42%).

##### IV.4.1 Résistance à la compression, absorption et vides perméables

Le tableau 10 offre une compilation des résultats de ces différents essais en fonction de l'âge des structures échantillonnées, classées par cycles de 10 ans. Tout comme dans le cas de l'inspection visuelle, il est nécessaire de mentionner qu'une telle compilation comporte bien des limitations puisqu'entre ces différents groupes, et à l'intérieur d'un même cycle d'âge, on peut retrouver des échantillons provenant 1) de structures construites avec des matières premières et selon des procé-

Tableau 9 Caractéristiques des composantes échantillonnées.

COMPOSANTES								
		Parapets	Trottoirs	Culées	Dalles	Piliers	Autres	STRUCTURES
NOMBRE		25	16	12	1	4	2	60
DEFAUTS		PRESENCE DU DEFAUT						
Fissures longitudinales	%	12	38	8	0	25	0	18
	Nb	(3)	(6)	(1)	(0)	(1)	(0)	(11)
Fissures polygonales	%	92	63	83	100	100	100	83
	Nb	(23)	(10)	(10)	(1)	(4)	(2)	(50)
Ecaillage	%	32	31	17	100	50	0	30
	Nb	(8)	(5)	(2)	(1)	(2)	(0)	(18)
Eclatements ("pop-outs")	%	20	31	0	0	0	0	17
	Nb	(5)	(5)	(0)	(0)	(0)	(0)	(10)
Délaminations + rouille	%	20	6	25	100	0	0	17
	Nb	(5)	(1)	(3)	(1)	(0)	(0)	(10)
Armatures visibles	%	20	6	17	100	0	0	15
	Nb	(5)	(1)	(2)	(1)	(0)	(0)	(9)
Exsudations	%	52	38	17	100	75	0	42
	Nb	(13)	(6)	(2)	(1)	(3)	(0)	(25)
Superficie atteinte		% des composantes						
<25%		0	29	67	0	25	0	20
25 à 75%		29	43	33	100	50	100	39
>75%		71	28	0	0	25	0	41

dés souvent fort différents, et 2) de différentes composantes de structures aux caractéristiques originelles ( $f'c$  exigé, etc.) également variables. Malgré cela, les résultats de ces différents essais semblent globalement correspondre à une évolution dans la technologie du béton, ainsi que dans les matériaux de construction ou produits associés comme le ciment, la pierre concassée, les adjuvants, etc. (voir tableau 10).

Tableau 10 Caractéristiques physico-mécaniques des échantillons de béton.

PERIODE DE CONSTRUCTION		COMPRESSION SIMPLE (MPa)	ABSORPTION (%)	VIDES PERMEABLES (%)	AIR (%)	L ( m )
<1955	moy.	47.0 (4)	6.7 (4)	16.6 (4)	3.2 (3)	377 (3)
	é.t.	4.3	0.9	2.4	1.2	83
56-65	moy.	36.5 (16)	5.3 (9)	13.4 (9)	4.8 (15)	300 (15)
	é.t.	8.4	0.7	1.1	3.2	165
66-75	moy.	39.3 (28)	5.3 (17)	13.4 (17)	5.3 (24)	238 (24)
	é.t.	8.1	0.6	1.9	2.1	67
76-85	moy.	49.4 (2)	5.0 (5)	12.4 (5)	5.5 (4)	212 (4)
	é.t.	4.9	0.3	0.9	1.7	61

\* Le nombre d'échantillons analysés est indiqué entre parenthèses.

Malgré un aspect externe souvent détérioré (écaillage, etc.), les bétons provenant de structures construites avant 1955 affichent souvent une résistance à la compression fort respectable, comme en témoigne la valeur moyenne de 47 MPa obtenue sur quatre des cinq échantillons de béton prélevés dans de telles structures. L'utilisation de dosages élevés en ciment, ainsi que de très grosses particules de pierres (>4-5 cm) était répandue

à cette époque, alors que les adjuvants tels que les entraîneurs d'air, les réducteurs d'eau, etc., étaient alors peu utilisés. Ces bétons se distinguent par des pourcentages d'absorption et de vides perméables globalement assez élevés (voir tableau 10). Certains d'entre eux, d'ailleurs caractérisés par un faible contenu en air entraîné et un facteur d'espacement moyen des bulles d'air ( $\bar{L}$ ) élevé, sont assez fortement écaillés.

La période comprise entre les années 1955 et 1975 correspond au développement de l'industrie du béton ainsi qu'à l'application des techniques modernes de production d'un béton contrôlé. C'est au cours de cette période qu'ont été construites la majorité des structures en béton de la région de Québec. Les carottes prélevées dans ces structures montrent une résistance à la compression un peu plus erratique (écart-type plus élevés), pour une moyenne se situant entre 36 et 39 MPa. Ce béton est en moyenne relativement moins perméable que celui du groupe précédent (i.e structures construites avant 1955; voir tableau 10).

Depuis 1976, l'industrie du béton est en plein essor. Cela est sans doute attribuable en bonne partie aux récents développements technologiques dans le domaine des adjuvants. La valeur moyenne de la résistance à la compression de 49 MPa (voir tableau 10), quoique basée sur seulement deux échantillons, représente malgré tout la tendance à la hausse observée au Québec depuis l'entrée en vigueur, en 1978, du système d'ajustement du prix

unitaire du béton en fonction de sa résistance à la compression. De plus, les fines fissures parfois observées sur certaines de ces jeunes structures ne sont généralement que superficielles et n'influencent par conséquent que très peu la résistance à la compression mesurée. Un tel béton est généralement moins perméable que ses prédécesseurs (i.e provenant de structures construites avant 1975; voir tableau 10).

#### IV.4.2 Caractéristiques des vides d'air (ASTM C457)

Les caractéristiques du réseau de bulles d'air ont été mesurées sur 48 plaques de béton taillées à une profondeur moyenne de 15 cm dans les carottes, et ce, afin d'éviter les valeurs souvent erratiques obtenues dans la zone superficielle du béton. De façon générale, une bonne corrélation est obtenue entre la mesure des caractéristiques du réseau d'air de tels échantillons et le comportement en écaillage du béton (Michel Pigeon, Colloque sur les bulles d'air dans le béton, Université Laval, juin 1987). Les résultats de cet essai sont rapportés dans le tableau 10.

L'amélioration des connaissances conséquentes à l'utilisation accrue d'agents entraîneurs d'air dans le béton depuis les deux ou trois dernières décennies, s'est globalement manifestée par: 1) l'augmentation significative du contenu en air dans le béton, et 2) la diminution progressive du facteur d'espacement

moyen ( $\bar{L}$ ) entre les bulles (voir tableau 10).

La figure 12 met en relation le pourcentage d'air et l'espacement moyen des bulles ( $\bar{L}$ ), tels que mesurés dans les échantillons de béton. Les différentes théories associent généralement de fortes probabilités d'écaillage pour le béton soumis à des cycles répétés de gel et dégel et à un  $\bar{L}$  supérieur à 200 à 300 micromètres (Powers 1949, 1954, Malhotra 1982, Pigeon et al. 1985), valeurs reliées au taux de gel enregistré durant les essais. Sur les 48 plaques de béton examinées, 15 montrent un  $\bar{L}$  supérieur ou égal à 300 micromètres, dont 10 provenant de structures atteintes d'écaillage (voir figure 12), 2 correspondant à des structures en bon état mais soumises à des conditions moins sévères d'exposition, 2 autres provenant de structures jeunes ne montrant pas à ce jour de signes de détérioration, et 1 prélevée dans un ouvrage ne montrant pas d'écaillage quoiqu'il soit soumis à des conditions assez sévères d'exposition.

A la lumière de ces résultats, il semble donc que l'espacement moyen critique des bulles d'air pour un béton soumis aux conditions climatiques et d'exposition prévalant sur le réseau routier de la région de Québec, pourrait se situer aux environs de 300 micromètres (voir figure 12). Cette valeur est très proche de celles proposées dans la littérature pour un béton soumis à des essais en laboratoire (Pigeon et al. 1985). De façon générale, un bon facteur d'espacement des bulles d'air est une condi-

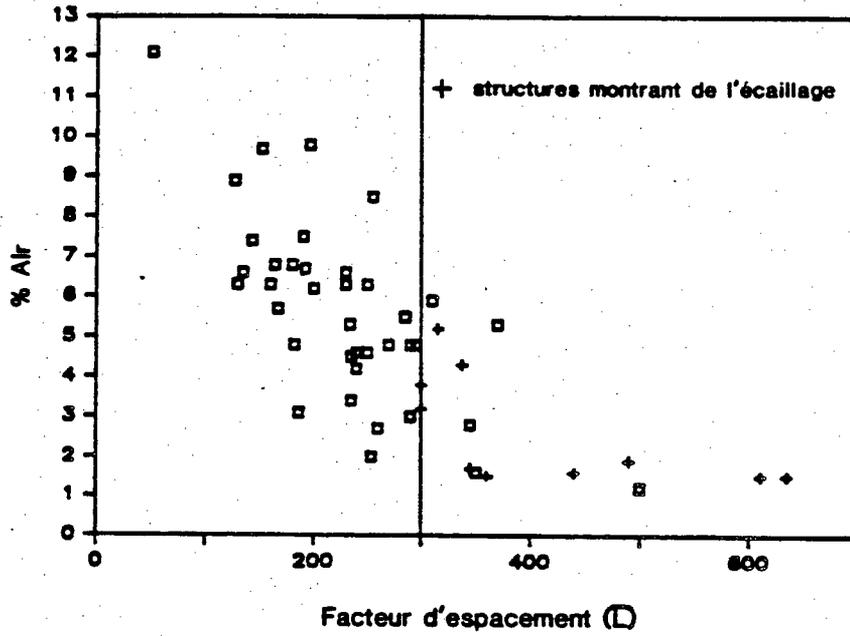


Figure 12 Caractéristiques du réseau de bulles d'air mesurées dans des échantillons de béton prélevés dans une cinquantaine de structures en béton de la région de Québec.

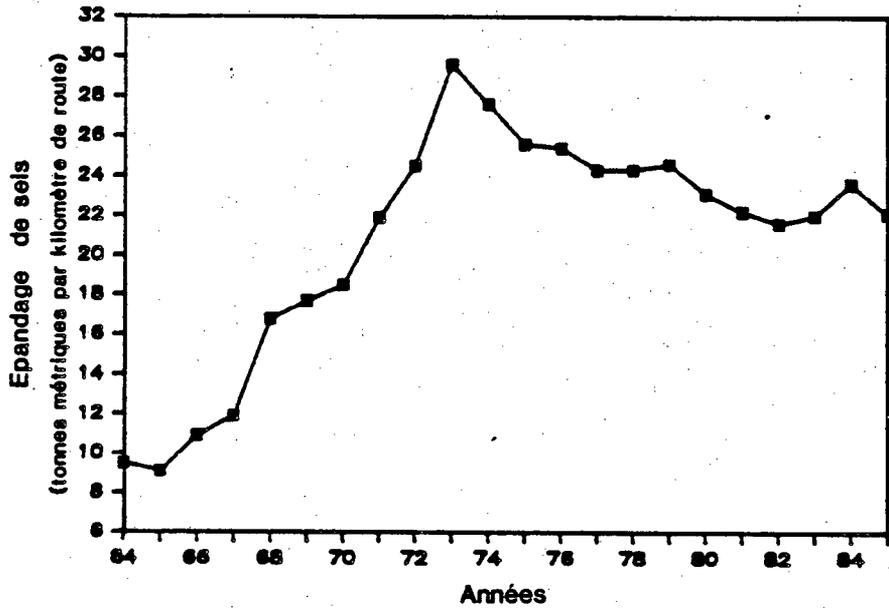


Figure 13 Epannage de sels sur les routes de la province de Québec au cours des 20 dernières années. Source: Ministère des Transports.

tion fondamentale mais non nécessairement suffisante pour qu'un béton résiste bien aux cycles de gel et dégel, d'autres facteurs tels que le rapport e/c, le type de granulats utilisé, les opérations de finition et de mûrissement, etc. jouant un rôle certain sur le comportement d'un béton soumis à un tel traitement (Michel Pigeon, Colloque sur les bulles d'air dans le béton, Université Laval, juin 1987).

#### IV.4.3 Teneur en chlorures

Les structures en béton du réseau routier québécois sont soumises à une application abondante de sels de déglacage au cours de la saison hivernale (voir figure 13). L'évaluation de la teneur en ions Cl dans certaines composantes de ces structures est essentielle afin de déterminer si les aciers d'armatures sont dans un environnement propice à la corrosion, les autres conditions essentielles à ce phénomène, l'oxygène et l'humidité, étant presque inévitablement présentes.

Les échantillons de forage analysés pour leur teneur en chlorures sont les mêmes que ceux étudiés pour leurs caractéristiques physico-mécaniques. Les spécimens requis ont été prélevés dans les carottes jusqu'à une profondeur de trois pouces (75 mm) sous la surface exposée du béton, et ce, à sec et à l'aide d'une foreuse rotative munie d'un collecteur de poussières (Morisson et al. 1976). Les carottes étudiées appartenaient à un

certain nombre de parapets, de trottoirs, de culées et de piliers. Le contenu en ions chlorures solubles à l'acide fut évalué selon la méthode proposée par Bermann en 1972. Les résultats sont cumulés au tableau 11, en pourcentage massique du béton.

Tableau 11 Teneurs en chlorures des échantillons de béton.

PROFONDEUR (po.)		TENEURS EN $Cl^{-}$ * (% massique du béton)			
		Parapets	Trottoirs	Culées	Piliers
0-1	moy.	0.13 (22)**	0.12 (16)	0.23 (6)	0.12 (4)
	é.t.	0.07	0.06	0.13	0.06
1-2	moy.	0.06 (21)	0.07 (17)	0.20 (6)	0.08 (4)
	é.t.	0.05	0.08	0.16	0.05
2-3	moy.	0.03 (12)	0.04 (9)	0.07 (4)	0.06 (2)
	é.t.	0.03	0.04	0.08	0.02

\* Chlorures solubles à l'acide

\*\* Le nombre d'échantillons analysés apparaît entre parenthèses.

D'après les travaux effectués par le Federal Highway Administration (Clear 1976) et en accord avec le rapport du comité ACI-222 (1985), la valeur limite des ions  $Cl^{-}$  dans le béton durci doit être de 0.20% en pourcentage massique du ciment, ce qui correspond en moyenne dans le cas de nos ouvrages à environ 0.025% en pourcentage massique du béton. Les aciers d'armatures des composantes carottées se situent généralement à une profondeur variant de deux à trois pouces (50 à 75 mm) sous la surface du béton. A une telle profondeur, on remarque que la teneur moyenne en ions  $Cl^{-}$  dépasse la limite de 0.025%, ce qui signifie que les aciers se retrouvent fréquemment dans un milieu

propice à la corrosion. Ceci explique certes pourquoi environ 40% des structures examinées dans le région de Québec présentent localement de la délamination et des traces de rouille sur au moins une de leurs composantes les plus exposées aux intempéries et à l'application de sels (voir tableau 7). On note également au tableau 11 que la teneur en ions  $Cl^-$ , à une profondeur correspondant aux aciers d'armatures, est en moyenne plus faible dans les parapets et les trottoirs que dans les culées et les piliers. Cette différence pourrait s'expliquer sans doute par le mouillage plus fréquent et plus important des deux premiers types de composantes, ceci ayant pour effet de diluer ou lessiver les chlorures du béton. Les observations effectuées lors de l'inspection visuelle, couplées à la compilation des analyses en ions chlorures et à l'examen pétrographique de carottes de béton, ont révélé que le délai d'apparition de ce phénomène, de même que la sévérité et la superficie des composantes atteinte par celui-ci sont principalement liées à la qualité et à l'épaisseur du recouvrement de béton, ainsi qu'à la sévérité des conditions d'exposition affectant chacune de ces composantes.

#### IV.4.4 Examen pétrographique des carottes de béton

Des articles récents rapportent des cas de réactivité alcaline dans le béton liés à des granulats calcaires siliceux (Bérard & Roux 1986, Bérubé & Fournier 1986, Fournier et al. 1987). Ce phénomène, lié à l'instabilité chimique en milieu alcalin,

lin des matériaux siliceux formant le résidu insoluble de ces calcaires, produirait, au sein des particules de granulats, des "veinules de gel de silice" d'une largeur pouvant atteindre jusqu'à 1mm et ayant tendance à s'amenuiser en périphérie du granulat (Bérard & Roux 1986).

L'examen mégascopique des carottes de béton prélevées dans les structures de la région de Québec a démontré que, outre l'écaillage et les fissurations plus ou moins importantes apparaissant à la surface du béton, défauts qui ne sont généralement que superficiels, les bétons sont dans un état global généralement satisfaisant. Néanmoins, les échantillons contiennent presque tous des particules de granulats fissurées (voir figure 14A), une proportion notable de ces microfissures étant souvent remplies d'un matériau insoluble de couleur blanchâtre. Ces microfissures sont généralement fines (<1 mm) et se prolongent de façon irrégulière dans la pâte de ciment, passant même parfois à travers des particules de granulats voisines. Elles ne semblent toutefois pas démontrer de tendance très nette à se former préférentiellement le long des plans de stratification du calcaire, comme c'était le cas pour les cylindres de roche (voir section III.2.2). D'ailleurs, elles longent assez souvent la bordure des particules.

Les microfissures (ou veinules blanchâtres) forment des plans de faiblesse où se propage de façon préférentielle la frac-

turation lorsqu'on soumet les échantillons à l'essai de résistance à la compression, ou qu'on les brise pour en faire l'examen pétrographique. On remarque alors un dépôt blanchâtre poudreux ou crayeux limité à la portion interne de ces surfaces de fracture par une espèce d'auréole périphérique foncée (voir figure 14B). Lorsque les microfissures se propagent dans la pâte de ciment, on retrouve souvent des dépôts de fines plaquettes de gel remplissant certains pores immédiatement adjacents au granulat, et tapissant parfois la pâte de ciment, sur une distance plus ou moins éloignée du granulat, selon que la microfissure est plus ou moins développée (voir figure 14C).

Le microscope électronique à balayage équipé d'un analyseur chimique à dispersion d'énergie des rayons X permet d'apporter plus de détails sur la nature chimique, minéralogique et texturale de ces produits de réaction (Bérubé & Fournier 1986). Les dépôts blanchâtres sur les granulats sont des produits cristallins en forme de rosettes riches en silicium et en potassium (voir figure 14E). Ces rosettes contiennent parfois même du sodium que l'on croit provenir principalement de l'application de sels de déglacage sur le béton, puisque cet élément s'est avéré passablement plus abondant dans les échantillons examinés provenant de composantes soumises à un épandage de sels que dans ceux prélevés dans des composantes peu ou non exposées. Les ciments de la région affichent des teneurs en alcalis généralement inférieures à 0.9% (en équivalent Na O), avec un pourcen-

tage en Na O variant entre 0.2 et 0.4%.. Pour sa part, l'auréole<sup>2</sup> périphérique foncée est constituée de plaquettes de gels siliceux montrant des microtextures variées (Bérubé & Fournier 1986) (voir aussi figure 14D). Les gels apparaissant sur les surfaces de fracture de la pâte de ciment sont plus calciques que ceux retrouvés à proximité immédiate ou au niveau de l'auréole foncée périphérique des granulats. Ils sont de plus fréquemment recristallisés (figure 14F), particulièrement dans les ouvrages plus âgés. L'ensemble de ces caractéristiques pétrographiques ont d'ailleurs été reconnues dans des échantillons prélevés sur des structures bétonnées atteintes de réactivité alcalis-silice et construites avec des granulats de natures fort diversifiées (Bérubé & Fournier 1986).

Le tableau 12 indique 1) les proportions de particules de granulats non fissurées, fissurées, et fissurées avec dépôts de produits blanchâtres, telles que mesurées sur près de 60 plaques de béton taillées et polies à partir d'échantillons (carottes ou prismes) de terrain ou de laboratoire, et 2) une cote arbitraire basée essentiellement sur l'abondance de dépôts de gels sur les surfaces de fractures de la pâte de ciment de ces mêmes échantillons de béton. Dans ce dernier cas, les échantillons ont été regroupés en quatre catégories: les fragments ne montrant pas de dépôt de gels siliceux sur la pâte ont reçu la cote 0, alors que des cotes variant de 1 à 3 ont été données à ceux montrant des dépôts de gels variant de peu abondants et essentiellement limi-

A. Microfissures et veinules blanchâtres dans des particules de granulats calcaires (échelle: 2 cm). Plaque polie provenant d'une carotte prélevée dans une culée d'une structure de béton agée de 10 ans.

B. Micrographie prise au stéréomicroscope d'une surface de fracture d'une carotte de béton montrant des signes évidents de réactivité alcalis-silice. On y remarque, sur les surfaces de "fissure" des granulats, des auréoles foncées (1) entourant des dépôts blanchâtres à texture poudreuse (2), et des dépôts de gels dans des pores de la pâte de ciment (3) (échelle: 5mm).

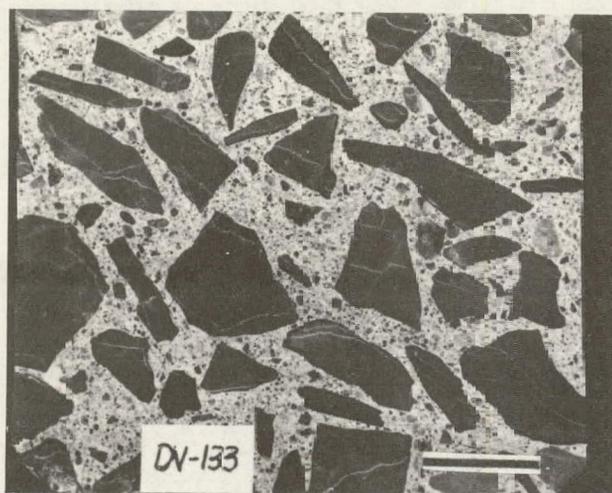
C. Micrographie prise au stéréomicroscope montrant d'abondants dépôts de gels silici-calciques sur une surface de fissure de la pâte de ciment (échelle: 5mm).

D. Micrographie prise au microscope électronique à balayage et spectre d'analyse chimique en dispersion d'énergie des rayons X des gels formant l'auréole foncée située en bordure interne des surfaces de "fissure" des granulats de la micrographie B (échelle 100 micromètres). Ces gels présentent généralement un rapport silicium/calcium plus élevé que ceux rencontrés sur les surfaces de fracture de la pâte de ciment.

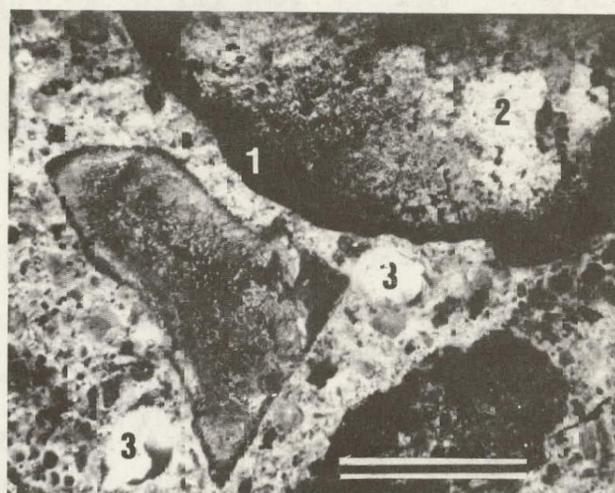
E. Micrographie prise au microscope électronique à balayage et spectre d'analyse chimique en dispersion d'énergie des rayons X des dépôts blanchâtres recouvrant la portion interne des surfaces de "fissure" des granulats de la micrographie B (échelle: 100 micromètres). Ces produits cristallins en forme de rosettes lamellaires ont une composition chimique caractéristiquement très stable.

F. Micrographie prise au microscope électronique à balayage et spectre d'analyse chimique en dispersion d'énergie des rayons X de gels recristallisés souvent retrouvés sur des surfaces de fracture de la pâte de ciment. Ces gels sont généralement plus riches en calcium et plus pauvres en silicium que ceux rencontrés sur les surfaces de "fissure" des granulats (micrographie D), et montrent une microtexture alvéolaire s'apparentant à celle de silicates de calcium hydratés (CSH).

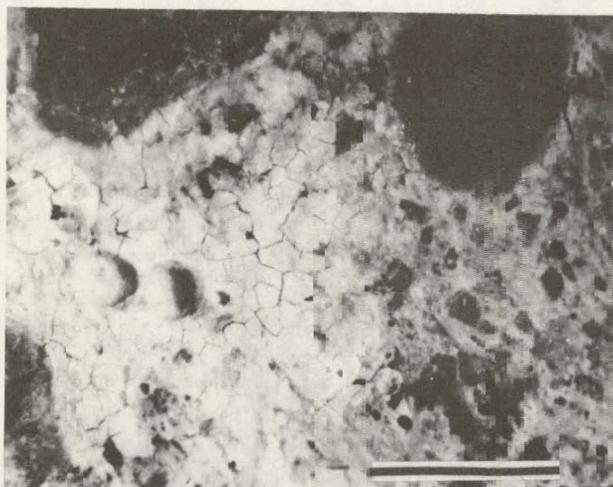
Figure 14 Examen pétrographique des carottes de béton.



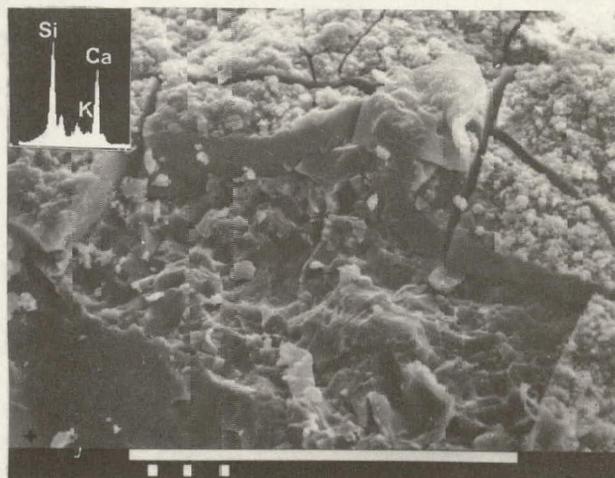
A



B



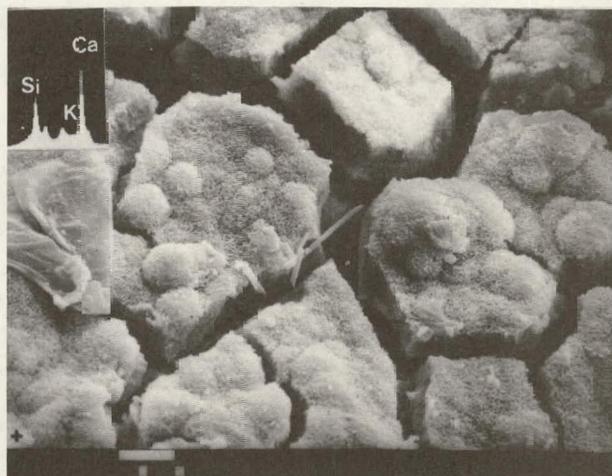
C



D



E



F

Figure 14

Tableau 12 Résultat de l'examen pétrographique d'échantillons de béton contenant des granulats calcaires.

ECHANTILLONS		(A) 48 carottes prélevées dans des composantes détériorées.				4 composantes moins détériorées (B)		3 échantillons de laboratoire <sup>2</sup> (C)	4 échantillons de laboratoire <sup>3</sup> (D)
INDICE PETROGRAPHIQUE DE REACTIVITE ALCALIS-SILICE <sup>1</sup>		Cote 0	Cote 1	Cote 2	Cote 3	Cote 0	Cote 1	Cote 0	Cote 2 ou 3
FREQUENCE (%)		29 (17)	45 (26)	16 (9)	10 (6)	75 (3)	25 (1)	100 (3)	100 (4)
Particules de granulats non fissurées (%)	avg.	43 (13)	20 (22)	12 (9)	15 (4)	41 (3)	20 (1)	62 (3)	23 (4)
	std.	17	10	7	5	10	-	2	4
Particules fissurées avec/sans dépôts blanchâtres	avg.	57	80	88	85	59	80	38	77
	std.	--	--	--	--	--	--	--	--
Particules fissurées sans dépôt blanchâtre	avg.	42 (13)	43 (22)	41 (9)	41 (4)	55 (3)	73 (1)	38 (3)	77 (4)
	std.	16	15	18	14	10	-	2	4
Particules fissurées avec dépôts blanchâtres	avg.	15 (13)	37 (22)	47 (9)	44 (4)	4 (3)	7 (1)	-----	-----
	std.	21	17	17	12	6			
RESISTANCE EN COMPRESSION (MPa) (carottes)	avg.	42 (13)	39 (22)	40 (8)	29 (4)	34 (3)	45 (1)	-----	-----
	std.	7	8	8	6	6	-		

N.B Le nombre d'échantillons analysés apparait entre parenthèse.

1 L'examen pétrographique a été réalisé à l'aide d'un stéréomicroscope (grossissement maximum utilisé 65x) sur des échantillons de différentes sources: 48 carottes prélevées dans des composantes de structures bétonnées montrant de la fissuration polygonale à leur surface (A), 4 échantillons prélevés dans des composantes moins détériorées de telles structures (B), et 7 échantillons de laboratoire (prismes) fabriqués avec des granulats calcaires des régions de Québec (3, C), et de Trois-Rivières (4, D). On peut remarquer 1) la proportion relative de particules fissurées et non fissurées (avec ou sans dépôts blanchâtres) telle que mesurée sur les plaques polies de béton, et 2) une cote arbitraire variant de 0 à 3, attribuée aux échantillons, après qu'ils aient été fracturés avec un marteau de géologue, et selon l'étendue des signes pétrographiques de réactivité alcalis-silice. Une telle cote est essentiellement basée sur l'abondance des dépôts de gels sur les surfaces de fractures de la pâte de ciment des échantillons correspondant: 0: aucun dépôt de gel sur ces surfaces; 1: gels observés essentiellement à proximité immédiate des particules de granulats; jusqu'à 3: grande quantité de gels couvrant des surfaces de plus en plus importantes de la pâte de ciment. En fait, cette classification représente une mesure indirecte du degré de microfissuration de la pâte de ciment.

2 Prismes de béton fabriqués avec des granulats calcaires de la région de Québec et ne montrant que de faibles valeurs d'expansion (<0.04% après 1 an).

3 Prismes de béton fabriqués avec des granulats réactifs de la région de Trois-Rivières et montrant de fortes valeurs d'expansion (>0.1% après un an). Noter l'absence de "veinules blanchâtres" dans les granulats. Néanmoins, l'examen pétrographique des échantillons a révélé que les surfaces de fractures à travers les granulats sont couvertes de gels massifs, leur donnant une texture cireuse lorsqu'observées au stéréomicroscope.

\* Seulement 7 échantillons sur les 13 analysés montrent des veinules blanchâtres dans les granulats.

\*\* Un seul échantillon sur les 3 montre des veinules blanchâtres dans les granulats.

tés à la périphérie immédiate des granulats (1), à très abondants et couvrant de grandes surfaces de la pâte de ciment (3).

Sur les 48 plaques de béton provenant de composantes exposées de structures de béton et présentant dans plus de 80% des cas une fissuration polygonale à leur surface, plus de 70% montraient des signes incontestables de réactivité alcalis-silice (dépôts de gels dans la pâte de ciment, cotes 1, 2 et 3; plus de 85% si l'on considère la seule présence de veinules blanchâtres au sein des granulats comme indicative d'un tel phénomène). Dans la plupart des cas cependant (cote 1 + cote 0 avec "veinules" blanchâtres), ces signes, quoiqu'évidents, étaient de faible envergure. Globalement, on remarque une démarcation assez nette quant aux proportions de particules non fissurées et fissurées (avec ou sans dépôts blanchâtres), entre les échantillons regroupés sous la cote 0 et ceux sous les cotes 1, 2 et 3, et ce, aussi bien chez les composantes détériorées que moins détériorées. La proportion de particules fissurées est généralement importante, une quantité notable de ces fissures provenant sans doute des processus de concassage des calcaires, comme le démontrent les observations effectuées sur les échantillons fabriqués en laboratoire. De plus, les échantillons de composantes détériorées regroupés sous la cote 0 contiennent en moyenne 15% de particules avec "veinules" blanchâtres. Il est à noter que seulement 7 des 13 échantillons de ce groupe montrent de telles veinules, et qu'elles y sont très fines et limitées aux granulats.

Les fines veinules blanchâtres présentes dans les granulats des échantillons prélevés dans des composantes de structures bétonnées, de même que les microfissures de la pâte de ciment remplies de gels siliceux, ne semblent influencer les valeurs de résistance à la compression du béton qu'une fois qu'elles sont devenues très importantes (cote 3, voir tableau 12). Cependant, on ne peut déceler une tendance claire avec l'âge des structures quant à l'abondance des granulats fissurés (contenant ou non des veinules blanchâtres).

## V. DISCUSSION

Il existe plusieurs façons de concevoir la notion de durabilité. De façon générale, on l'associe d'abord à la capacité que possède des matériaux, des composantes ou structures, à remplir les fonctions pour lesquelles ils (ou elles) ont été conçus (es) ou construits (es), et ce, pendant une période de temps donnée (ASTM E632-78). Cependant, qu'en est-il de la dégradation résultant d'altérations physiques, mécaniques ou chimiques, qui ne mettent certes pas en danger la "serviceability" du matériau ou de la structure, mais qui affectent néanmoins leur apparence et exigent parfois des réparations non planifiées atteignant des coûts importants ? Il semble donc essentiel de discerner entre la durabilité ou "serviceability" d'une structure proprement dite, et la durabilité du matériau qui la constitue, soit le béton.

Les structures de la région de Québec, quoique fréquemment touchées par certains types de défauts (voir tableau 7), montrent un état de détérioration actuellement peu sévère qui ne met que très rarement en cause leur "serviceability". A vrai dire, on ne reconnaît pas dans la région un problème entraînant une détérioration sévère et généralisée des structures en béton. Néanmoins, les composantes (ou parties de celles-ci) soumises à des conditions sévères d'exposition, soit les parapets, les trottoirs et les murs de culées, présentent souvent des défauts dont l'importance et l'étendue pourraient exiger dans un avenir plus

ou moins rapproché certaines réparations. Ces composantes sont en effet fréquemment soumises à des cycles de mouillage et séchage, et de plus, en saison hivernale, à des périodes de gel prolongé ainsi qu'à des cycles de gel et dégel, le tout combiné à l'application de sels de déglacage. Ces conditions jouent de toute évidence un rôle déterminant sur l'apparition et l'évolution de défauts tels que l'écaillage, les éclatements (pop-outs), les délaminations et les fissures polygonales. L'intensité avec laquelle chacun de ces défauts affecte une composante donnée est fonction de la sévérité des conditions d'exposition, ainsi que de la qualité du béton lui-même. Nos observations combinées aux données tirées de la littérature semblent démontrer qu'il est possible de diminuer grandement les détériorations, en particulier les problèmes d'écaillage et de corrosion-délamination, 1) en s'assurant que le béton contient un pourcentage d'air adéquat combiné à un espacement moyen des bulles ( $\bar{L}$ ) inférieur à 300 micromètres, 2) en planifiant un système de drainage efficace, et 3) en recouvrant les aciers d'armatures d'au moins 40 mm de béton dense et de bonne qualité. Le contrôle adéquat de la qualité des matériaux à la source représente certes une bonne façon de minimiser les risques de problèmes pour l'avenir. et ceci est fort important, une mauvaise conception de certains éléments des structures en béton, de même que des travaux de mise en oeuvre et de mûrissement inadéquats peuvent rapidement détruire les efforts des producteurs de ciments, de granulats et de béton.

Les causes entraînant la formation de fissures sont souvent moins évidentes. La fissuration polygonale de surface et la microfissuration (accompagnée ou non de dépôts blanchâtres) des particules de granulats, constituent globalement les phénomènes les plus fréquemment observés sur les structures de béton du district administratif de Québec, et ce, malgré le fait que les structures ont souvent pu être construites avec des techniques ou matériaux différents au cours de toutes ces années. Ces phénomènes apparaissent plus ou moins rapidement, et principalement, à ce jour, sur les composantes ou sections de celles-ci qui sont soumises à des conditions sévères d'exposition ainsi qu'à l'application de sels de déglacage.

Les divers essais effectués en laboratoire ont démontré que les granulats calcaires de la séquence stratigraphique de la région de Québec présentaient des propriétés mécaniques généralement satisfaisantes, mais un certain potentiel, quoique globalement marginal selon les essais effectués, de réactivité alcalis-silice. L'examen pétrographique détaillé d'une soixantaine de carottes prélevées dans certaines composantes de structures en béton de la région sur la base de certains indices généralement associés aux réactions alcalis-silice (fissuration polygonale, exsudations, etc.) a permis d'y reconnaître des signes d'un tel phénomène dans plus de 70% des cas, ces signes étant toutefois généralement de faible envergure, et semblant n'affecter, à ce

jour, que les composantes soumises à des conditions sévères d'exposition. Cependant, un certain nombre de celles-ci ayant développé de la fissuration polygonale à leur surface, quoiqu'elles présentent à l'examen pétrographique une proportion globalement importante de particules de granulats fissurés, ne montrent que peu de signes évidents de réactivité alcalis-silice (veinules blanchâtres dans les granulats, dépôts de gel sur les surfaces de fracture ou dans les pores de la pâte de ciment), ce qui semble suggérer que ce phénomène n'est pas nécessairement le seul responsable du développement rapide d'un tel motif de fissuration à la surface de ces composantes.

Néanmoins, plusieurs observations indiquent que l'utilisation de granulats calcaires régionaux combinée à des conditions sévères d'exposition est vraisemblablement à la source de la formation de ces fissures polygonales à la surface du béton. En effet, l'examen visuel d'une structure de béton de 10 ans n'ayant jamais été ouverte à la circulation (et n'ayant ainsi jamais été soumise à des cycles de gel et dégel et de mouillage et séchage en présence de sels de déglacage) n'a montré la présence d'aucune fissuration polygonale comparativement à des structures adjacentes du même âge qui en présentent au moins sur les parapets et les faces externes de culées. De plus, les structures en béton situées dans la région voisine de Lévis et fabriquées avec des granulats différents, généralement des grès lithiques (grauwackes), ne présentent aucune fissuration polygo-

nale, et ce, même sur leurs composantes de même âge et exposées de façon équivalente à celles de la région de Québec. L'examen pétrographique de carottes de béton prélevées dans ces composantes n'a révélé la présence d'aucun signe particulier de détérioration ou de réactivité alcalis-granulats.

Les fissures observées à la surface des composantes échantillonnées ainsi qu'à l'intérieur des carottes de béton, ne semblent influencer le comportement mécanique du béton, évalué par résistance à la compression, que lorsqu'elles sont très importantes. Bérubé et al. (1986) ont obtenu des résultats du même type dans le cadre d'une expertise privée effectuée sur des échantillons provenant de bases en béton, quoique non exposées à des sels de déglacage, mais montrant dans certains cas particuliers des signes importants de réactivité alcalis-silice. En effet, les bases contenant des granulats calcaires montraient d'importants signes de gonflement accompagnant un motif de fissuration polygonale et des exsudations à leur surface, alors que celles construites avec un granulats de nature différente ne montraient aucun de ces phénomènes. La détérioration observée n'était significative que dans la portion supérieure des éléments de béton, sans doute accélérée par les phénomènes de gel et dégel. Pour sa part, la proportion de particules de granulats fissurés, de l'ordre de 60% à la surface, ne diminuait que rarement en dessous de 40% dans l'ensemble des échantillons examinés. De plus, l'examen pétrographique d'échantillons provenant d'autres éléments ou

structures bétonnées de la région de Québec (non inventoriés dans cette étude) et montrant de la fissuration polygonale à leur surface, a révélé la présence de signes évidents de réactivité alcalis-silice (Bérubé & Fournier 1986, Bérubé et al. 1986, Bérubé et al. 1987b, Fournier & Bérubé 1985, 1987).

La combinaison exacte des facteurs et processus responsables de l'apparition parfois rapide de la fissuration polygonale à la surface de plusieurs composantes des structures de la région administrative de Québec et contenant des granulats calcaires n'est pas connue avec certitude. Il s'agit vraisemblablement de changements volumétriques différentiels entre les granulats calcaires et la pâte de ciment, phénomènes qui se produiraient surtout dans la couche superficielle des composantes en béton soumises à des conditions sévères d'exposition et à l'application de sels de déglçage. Les granulats calcaires se sont d'ailleurs souvent montrés sensibles à de telles conditions (Callan 1952, Stark 1976, Hudec 1980a et b, 1987, Bukovatz & Crumpton 1981, Stith 1983). Cette hypothèse reste toutefois à vérifier, et c'est ce à quoi nous travaillons actuellement.

Les techniques et les pratiques modernes de mise en oeuvre du béton, comme l'utilisation accrue d'adjuvants favorisant une meilleure maniabilité et une mise en place plus facile du béton, la vibration du béton dans des formes, les opérations de finition mécaniques et manuelles, l'utilisation de ciments à prise

accélérée permettant un décoffrage rapide, les périodes réduites de mûrissement, peuvent favoriser dans l'ensemble la formation d'une couche superficielle de béton ayant des propriétés distinctes de celles du béton massif, et possiblement plus susceptible d'altération en présence de conditions sévères d'exposition.

## VI. CONCLUSION

Le réseau routier du district administratif de Québec est relativement jeune puisqu'au moins les deux tiers des structures en béton qui le composent ont moins de 20 ans. Quoique la plupart de ces structures construites avec des granulats calcaires locaux présentent au moins un défaut sur au moins une de leurs composantes, la sévérité des détériorations ne met que rarement en danger leur "serviceability". Toutefois, pour des raisons d'esthétique, certaines structures devront éventuellement subir des réparations plus ou moins importantes.

Les fissures polygonales et longitudinales, l'écaillage, les exsudations et les délaminations sont des défauts assez fréquemment rencontrés dans les structures de la région. Ils sont toutefois généralement concentrés au niveau des composantes ou sections de celles-ci soumises à des conditions sévères d'exposition (mouillage et séchage, gel et dégel, sels de déglacage, eaux de drainage mais canalisées, etc.). Le développement des connaissances dans le domaine de la technologie du béton a certes permis d'améliorer les propriétés physico-mécaniques de celui-ci. L'utilisation d'agents entraîneurs d'air a, entre autres choses, amélioré sa résistance à l'écaillage. Le nombre de défauts de tout type par structure est globalement plus important chez les plus vieilles structures, mais ce n'est pas nécessairement le cas pour chaque type de défaut. En effet, la fissu-

ration polygonale et les éclatements (pop-outs), contrairement à la tendance observée, semble affecter plus fréquemment les plus jeunes structures.

Des études effectuées en laboratoire ont indiqué que les granulats calcaires de la région de Québec présentaient des propriétés physico-mécaniques généralement satisfaisantes et un certain potentiel, quoique marginal selon les essais effectués à ce jour, de réactivité alcalis-silice. L'examen pétrographique d'échantillons provenant de près de quatre-vingt structures ou éléments bétonnés de la région construits avec de tels granulats (observations effectuées dans le cadre de ce projet ou ailleurs) et montrant souvent des signes associés à de telles réactions (fissuration polygonale, exsudations, etc.), a effectivement permis de déceler des indices caractéristiques de ces réactions, mais à différents degrés, ce qui nous permet de croire que ce phénomène n'est pas nécessairement le seul responsable dans l'apparition souvent rapide des fissures polygonales à la surface des composantes examinées. Quoi qu'il en soit, la nature de ces granulats, combinée à des conditions sévères d'exposition, joue de toute évidence un rôle important dans ce type de détérioration puisque ce phénomène n'a pas été observé sur une structure non ouverte à la circulation et construite avec des granulats calcaires du même type, ainsi que sur les structures de la région voisine, aussi âgées et sévèrement exposées, mais construites avec un autre type de granulat.

## VII. REMERCIEMENTS

Cette étude a été rendue possible grâce à l'aide financière et matérielle des ministères des Transports et de l'Energie et des Ressources du Québec. Nous tenons à remercier vivement messieurs Henri-Louis Jacob et Joel Brun du ministère de l'Energie et des Ressources pour leur aide lors de la préparation et de l'élaboration de ce projet, ainsi que le personnel de l'Usine Pilote. Nous tenons à souligner de façon toute particulière, l'apport du personnel des sections "Béton de Ciment", "Sol et Granulats" et "Chimie" du Laboratoire Central du ministère des Transports. Merci également à Mme Sylvie Lefrançois pour son aide lors du traitement informatique des données de cette étude et à M. Jean Frenette pour l'aide apportée lors de la préparation du manuscrit.

Nous ne voudrions pas oublier de remercier les exploitants des carrières étudiées pour leur attitude positive face à ce projet et pour nous avoir procuré toutes les facilités nécessaires à l'échantillonnage de leur carrières.

Les Fonds pour la Formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR), ainsi que le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ont également contribué financièrement à ce projet.

### VIII. REFERENCES

Aitcin, P.C., Jolicoeur, G. & Mercier, M. (1983): Technologie des granulats. Les Editions du Griffon d'Argile Inc., 372p.

American Concrete Institute Manual of Concrete Practice (1984) - Part 1: Materials and general properties of concrete. Guide for making a condition survey of concrete in service - ACI 201.1R - 68, reported by ACI Committee 201.

American Concrete Institute Committee 222 (1985): Corrosion of metals in concrete, ACI Journal, Vol. 82, No. 1, pp. 3-32

Annual Book of ASTM Standards, Part 14: Concrete and Mineral Aggregates, Part 18 ANSI/ASTM E 632-78.

Association Canadienne de Normalisation, CAN3-A23.1-M77, Béton - Constituants et exécutions des travaux; Essais concernant le béton + Supplement No. 2-1986, Norme nationale du Canada.

Bérard, J. & 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.

Berissi, Festor, Fragnet & Basso (1975): Défauts apparents des ouvrages d'art en béton. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes du Ministère de l'Equipement, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 67 p.

Bermann, H.A. (1972): Determination of chloride in hardened portland cement paste, mortar and concrete. Report FHWA-RD-7212, Federal Highway Administration, Washington D.C., 22p.

Bérubé, M.A. & Fournier, B. (1986): "Les Produits de la réaction alcalis-silice dans le béton - Etude de cas de la région de Québec". Canadian Mineralogist, Vol. 24, pp. 271-288.

Bérubé, M.A., Langlois, M. & Frenette, J. (1986): Rapport privé d'expertise. Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur, Rapport GGL-86-31, Université Laval.

Bérubé, M.A., Fournier, B & Frenette, J. (1987a): Evaluation de la performance de divers ciments face aux réactions alcalis-granulats dans le béton. Rapport GGL-87-15, Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur, Université Laval, 72p (Soumis à Ciment St-Laurent).

Bérubé, M.A., Fournier, B., Vézina, D. & Frenette, J. (1987b): Alkali-aggregate reactivity in concrete structures from the Quebec city area - Field Trip Guidebook. Rapport GGL-87-19, Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur, Université Laval, 30p. + annexes.

Bérubé, M.A., Fournier, B. & Ouellet, C. (1987c): Discussion de l'essai de la Méthode Chimique ASTM C289 - Proposition de recherche. Rapport GGL-87-04, Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur, Université Laval, 42p.

Brun, J. (1977): Etude géologique et géochimique des formations du Black River et du Trenton du Québec. Ministère des Richesses Naturelles, DP-498, 54p.

Brun, J. & Chagnon, A. (1979): "Rock stratigraphy and clay mineralogy of volcanic ash beds from the Black River and Trenton Groups (Middle Ordovician) of southern Quebec". Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 20, pp. 1499-1507.

Bukovatz, J.E. & Crumpton, C.F. (1981): Study of D-cracking in portland cement concrete pavements. Report No. FHWA-Ks-81-2, Department of Transportation, Kansas, 70p.

Callan, E.J. (1952): "Thermal expansion of aggregates and concrete durability". ACI Journal, Vol. 23, No. 6, pp. 485-504.

Calleja, J. (1980): Sous-thème VII-2 : Durabilité. Compte-rendus du 7e Congrès International sur la Chimie du Ciment, Paris, 50p.

Canadian Standards Association, National standards of Canada (CAN3) (1977), 260p.; + Supplement No. 2-1986 to CSA CAN3-A23.1-M77 (Concrete materials and methods of concrete construction) and CAN3-A23.2-M77 (Methods of test for concrete) - CAN3-A23.1-M77, Appendix B: Alkali-aggregate reaction. - CAN3-A23.2-M77, A23.2-14A: Potential expansivity of cement aggregate combination (Concrete Prism Expansion Method).

Clear, K.C. (1976): Time-to-corrosion of reinforcing steel in concrete slabs. V.3: Performance after 830 daily salt applications. Report No. FHWA-RD-76-70, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 64p.

Communauté urbaine de Québec (1983): Agglomération de Québec - Inventaire et renseignements, 49 p.

Deloye, F.X., Maire, G. & Buisson, M.J. (1983): "Utilisation des exsudats comme indicateurs primaires de dégradation des bétons et maçonneries d'ouvrages d'art". Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, Paris, No. 124, pp. 25-30.

Dent-Glasser, L.S. & Kataoka, N. (1981): "The chemistry of alkali-aggregate reactivity". Cement and Concrete Research, Vol. 11, pp. 1-9.

Diamond, S. (1975): "A review of alkali-silica reactivity and expansion mechanisms: 1. Alkalis in cements and in concrete pore solutions". Cement and Concrete Research, Vol. 5, pp. 329-346.

Dolar-Mantuani, L. (1964): "Expansion of Gull River carbonate rocks in sodium hydrate". Highway Research Record, No. 45, pp. 178-195.

Dunham, R.J. (1962): "Classification of carbonate rocks according to depositional texture". Classification of carbonate rocks (W.E. Ham editor), American Association of Petroleum Geologist, Memoir 1, pp. 108-121.

Duncan, M.A.G., Swenson, E.G., Gillott, J.E. & Foran, M.R. (1973): "Alkali-aggregate-reaction in Nova Scotia - Part I - Summary of 5-year study". Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 1, pp. 55-70.

Emery, J.J., Bickley, J.A., & MacDonald, P. (1985): Durable concrete repair techniques. A Road and Transportation Association of Canada Publication, 113p + annexes.

Fournier, B. & Bérubé, M.A. (1985): Caractérisation des granulats calcaires exploités dans la région de Québec et évaluation de leur potentiel de réactivité alcaline. Rapport GGL-85-20, Université Laval, 207p.

Fournier, B. & Bérubé, M.A. (1987): Rapport privé d'expertise. Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur, Rapport GGL-87-25, Université laval.

Fournier, B., Bérubé, M.A., & Vézina, D. (1985): Investigation of the alkali-reactivity potential of the calcareous aggregates of the Quebec City area. Présentation au Congrès Progress in Concrete 85, Ottawa, 40 p. + planches.

- Fournier, B., Bérubé, M.A. & Vézina, D. (1987): Investigation of the alkali-reactivity potential of limestone aggregates from the Quebec city area (Canada). Compte-rendus du 7th Congrès International sur les réactions alcalis-granulats, Ottawa, 7p.
- Frohnsdorff, G. & Masters, L.W. (1980): The Meaning of durability and durability prediction. Proceedings of the First International Conference on Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691, P.J. Sereda and G.G. Litvan Eds., pp. 17-30.
- Gilbert, P., Trépanier, G. & Windisch, E.J. (1981): Normes de contrôle qualitatif des granulats pour la construction routière - Etude bibliographique. Association québécoise du Transport et des Routes Inc., 313p.
- Grabau, A.W. (1904): "On the classification of sedimentary rocks". American Geologists", Vol. 33, pp. 228-247.
- Grattan-Bellew, P.E. (1981): A review of test methods for alkali-expansivity of concrete aggregates. Compte-rendus du 5e Congrès International sur les réactions alcalis-granulats, Cape Town (Afrique du Sud), S259/9, 15p.
- Hobbs, D.W. (1982): "Alkali-aggregate reaction in concrete - Limiting alkali contents of concrete including the use of blended cements". Course conference 240E/2, Conference and Training Centre, 19p.
- Hooton, D. (1987): Effect of containers on ASTM C441 pyrex mortar bar expansion. Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-aggregate Reaction, Ottawa 1986, sous presse.
- Houde, R. (1986): Etude des granulats à béton réactifs aux alcalis de la région de Trois-Rivières. Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, 188p. + planches.

- Hudec, P.P. (1980a): Durability of carbonate rocks as function of their thermal expansion, water sorption, and mineralogy. Proceedings of the First International Conference on Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691, P.J. Sereda and G.G. Litvan Eds., pp. 497-508.
- Hudec, P.P. (1980b): Effect of deicing salts on deterioration and dimensional changes of carbonate rocks. Proceedings of the First International Conference on Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691, P.J. Sereda and G.G. Litvan Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 629-640.
- Hudec, P.P. (1987): Deterioration of aggregates - the underlying causes. Proceedings of the Katherine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, Atlanta 1987, 18p.
- Idorn, G.M. & Roy, D.M. (1984): "Factors affecting the durability of concrete and the benefits of using blast-furnace slag cement". Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 6, No. 1, pp. 3-10.
- Malhotra, V.M. (1982): "Mechanical properties and freezing and thawing resistance of non-air-entrained, air-entrained, and air-entrained superplasticized concrete using ASTM test C 666, Procedures A and B". Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 4, No. 1, pp. 3-23.
- Manning, D.G. & Bye, D.H. (1983): Bridge deck rehabilitation manual -Part One: Condition surveys. Research and Development Branch - Ontario Ministry of Transportation and Communications, 93p.

- Mielenz, R.C. & Benton, E.J (1958): "Evaluation of the quick chemical test for alkali-reactivity of concrete aggregate". Highway Research Board Bulletin 171, pp. 1-15.
- Morisson, G.L., Virmani, Y.P., Ramamurti, K. & Gilliland, W.J. (1976): Rapid In situ determination of chloride ion in portland cement concrete bridge decks. Final Report no. FHWA-Ks-RD-75-2, Kansas Department of Transportation, 27p. + appendix.
- Neville, A.M. (1981): Properties of Concrete. Pitnam Publishing Limited, London, 3e édition, 779p.
- Oberholster, R.E., Van Aardt, J.H.P. & Brandt, M.P. (1984): Durability of cementitious systems. Chap. 8 dans Structure and performance of cements, P. Barnes Ed., Applied Science publishers Ltd, Essex, England, pp. 365-413.
- Oberholster, R.E. & Davies, G. (1986): "An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates". Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp. 181-189.
- Pigeon, M., Prévost, J. & Simard, J.M. (1985): "Freeze-thaw durability versus freezing rate". ACI Journal, Vol. 82, No. 5, pp. 684-692.
- Powers, T.C. (1949): "The air requirement of frost-resistant concrete". Proceedings Highway Research Board, Vol. 29, pp. 184-202, + discussion, pp. 203-211.
- Powers, T.C. (1954): "Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete", ACI Journal, Proceedings Vol. 50, No. 9, pp. 741-760.

- Rasheeduzzafar, Dakhill, F. H. & Al-Gahtani, A.S. (1984): "Deterioration of concrete structures in the environment of the Middle East". ACI Journal, Vol. 81, No. 1, pp 13-20.
- Regourd, M. (1982): "La Résistance du béton aux altérations physiques et chimiques". Le Béton Hydraulique, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 513-530.
- Rogers, C.A. (1985): Evaluation of the potential for cracking due to alkali-carbonate reaction. Report EM-75, Ministry of Transportation and Communications of Ontario, 38p.
- Slater, J.E. (1983): Corrosion of metals in association with concrete. ASTM STP 818, 83p.
- Smith, P. (1972): "15 years of living at Kingston with a reactive carbonate rock". Transportation Research Record No. 525, pp. 23-37.
- 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.
- Stark, D. (1975): Characteristics and utilization of coarse aggregates associated with D-cracking. ASTM STP 597 - Living with Marginal Aggregates, pp. 45-58.
- Stith, D.A. (1983): Physical properties of carbonate aggregate from Ohio. Report of Investigation No. 121, State of Ohio Department of Natural Resources, Division of Geological Survey, 17p.
- Swenson, E.G. & Gillott, J.E. (1960): "Characteristics of Kingston carbonate rock reaction". Highway Research Board, Bulletin 275, pp. 18-31.

Weaver, W.E. & Isabelle, H.L. (1968): Observations of sidewalks concrete during 15 years exposure. Performance of Concrete, A symposium in Honour of T. Thorvaldson, U. of T.



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 066 828