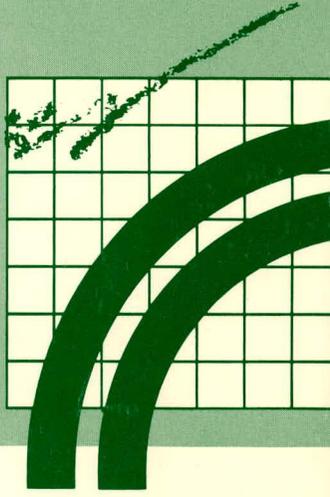


**ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS**



**ÉVALUATION DU POTENTIEL DE RÉACTIVITÉ ALCALINE
DANS LE BÉTON DES SABLES ET GRAVIERS NATURELS
DU QUÉBEC**

**MARC-ANDRÉ BÉRUBÉ
PASCAL MONGEAU
GUY TREMBLAY
DANIEL VÉZINA**



**ESSAIS
ET MATÉRIAUX**

CANQ
TR
169

Québec 

310476

**ÉVALUATION DU POTENTIEL DE RÉACTIVITÉ
ALCALINE DANS LE BÉTON DES SABLES
ET GRAVIERS NATURELS DU QUÉBEC**

Marc-André Bérubé
Pascal Mongeau
Guy Tremblay
Daniel Vézina

MAI 1993

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
22^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

Rapport produit dans le cadre du programme Actions
concertées du FCAR sur l'entretien et la réhabilitation
du réseau routier du Québec (N^o 90-RR-0032).

DOR-CEN-MON

CANQ
TR
169



Titre et sous-titre du rapport Évaluation du potentiel de réactivité alcaline dans le béton des sables et graviers naturels du Québec				N° du rapport Transports Québec RTQ-93-07	
Rapport d'étape <input type="checkbox"/> An Mois Jour				Rapport final <input checked="" type="checkbox"/> 93 06 10	
Auteur(s) du rapport Marc-André Bérubé, Pascal Mongeau, Guy Tremblay, Daniel Vézina				N° du contrat (RRDD-AA-CCXX)	
Chargé de projet Marc-André Bérubé				Date du début d'étude 89-05-01	
				Date de fin d'étude 91-08-31	
				Coût de l'étude 65 580 \$	
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Groupe de recherche en géologie de l'ingénieur Département de géologie et de génie géologique Université Laval Sainte-Foy (Québec) G1K 7P4			Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Fonds FCAR, programme Actions concertées sur l'entretien et la réhabilitation du réseau routier au Québec		
But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires Les objectifs de l'étude étaient les suivants : évaluer le potentiel de réactivité alcaline des sables et graviers naturels exploités au Québec comme granulats à béton; déterminer les essais les plus utiles afin de déterminer de manière fiable et rapide le potentiel de réactivité de ces matériaux; et, faire des recommandations sur leur utilisation dans le béton.					
Résumé du rapport Le tout a débuté par l'échantillonnage de dix-neuf sources géologiquement et géographiquement représentatives des gravières québécoises produisant à la fois des sables et des graviers à béton. Les matériaux recueillis ont subi toute une série d'essais et d'analyses en laboratoire afin d'en évaluer le potentiel de réactivité alcaline dans le béton. Ils ont finalement été évalués sur la base des cinq essais d'expansion suivants : mortier accéléré ASTM C9-P214 (norme d'acceptation seulement, de 0,15 % à 14 jours); mortier à l'autoclave (norme d'acceptation seulement, de 0,15 % à 5 heures); béton ACNOR (norme de refus seulement, de 0,04 % à 18 mois); béton ACNOR modifié (avec 410 kg/m³ de ciment au lieu de 310 kg/m³, norme d'acceptation seulement, de 0,04 % à un an), et mortier ASTM C227 (norme d'acceptation avec réserve et norme de refus, de 0,05 % à six mois, lorsque les essais précédents n'étaient pas concluants). Les sables n'ont subi que les trois essais sur mortier. Sur ces bases, tous les sables et graviers du Grenville (rive nord du Saint-Laurent) et du Supérieur (Abitibi) ont été classés non réactifs, à l'exception d'un seul sable du Grenville, alors que seulement la moitié environ des sables et graviers des Appalaches (Gaspésie et Estrie) se sont classés non réactifs, dont plusieurs avec réserve. L'organigramme proposé pour l'évaluation en laboratoire du potentiel de RAG des granulats naturels du Québec ne retient pour sa part que quatre essais : l'examen pétrographique (optionnel), l'essai accéléré sur mortier ASTM C9-P214 ou l'essai sur mortier à l'autoclave (norme d'acceptation), et l'essai sur béton ACNOR modifié (norme d'acceptation ou de refus), en utilisant toutefois un dosage en ciment de quelque 365 kg/m³. Cet essai modifié est recommandé aussi bien pour tester un gravier (avec sable non réactif) qu'un sable (avec un gros granulat non réactif) ou un mélange sable/gravier particulier. Cette dernière option est fortement recommandée dans le cas des sources fournissant à la fois les deux types de granulats, et aurait possiblement mené à des conclusions moins généreuses dans le cas de certaines sources étudiées, particulièrement des Appalaches. Rappelons toutefois que des résultats de laboratoire ne peuvent en aucun cas remplacer les renseignements obtenus sur la performance en service des granulats, lorsque ceux-ci sont disponibles. Quoique limités dans le cas des granulats naturels du Québec, ces renseignements montrent que ces matériaux présentent une bien meilleure performance globale que les calcaires des basses-terres du Saint-Laurent et les schistes à chlorite de la région Sherbrooke, par exemple.					
Nbre de pages 108	Nbre de photos 0	Nbre de figures 25	Nbre de tableaux 22	Nbre de références bibliographiques 63	Langue du document <input checked="" type="checkbox"/> Français <input type="checkbox"/> Anglais
Mots-clés Béton de ciment; Essais accélérés; Granulats; Graviers; Réactions alcalis-granulats; Sables				Autre (spécifier)	
				Autorisation de diffusion <input checked="" type="checkbox"/> Diffusion autorisée <input type="checkbox"/> Diffusion interdite	
				Signature du directeur général <i>Liyen Huse</i>	
				Date 21-06-93	

REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier tous ceux qui ont permis de mener à bien ce projet de recherche réalisé par le département de Géologie et de génie géologique de l'Université Laval en collaboration très étroite avec le ministère des Transports du Québec. Merci à tout le personnel technique et professionnel des deux institutions qui ont participé aux travaux, et particulièrement à Jean Frenette, Nathalie Dupont et Benoit Fournier, de même qu'aux propriétaires et au personnel des exploitations visitées pour l'intérêt qu'ils ont manifesté lors de notre visite et pour leur collaboration à l'échantillonnage. C'est grâce à une subvention de recherche du Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) accordée à l'Université Laval dans le cadre du programme Actions concertées sur l'entretien et la réhabilitation du réseau routier du Québec que ce projet a pu se réaliser.

RÉSUMÉ

Au moment du démarrage du projet, en mai 1989, on ne savait pas trop quel était le véritable potentiel de réactivité alcaline, dans le béton, des granulats naturels du Québec. Nous avons donc échantillonné 19 sources représentatives distribuées sur tout le territoire du Québec et produisant à la fois des sables et des graviers à béton, soit six sur la rive nord du Saint-Laurent (Groupe géologique du Grenville), six en Gaspésie (Appalaches), quatre en Estrie (Appalaches) et trois en Abitibi (Supérieur). Un gravier réactif de la région de Sudbury (Supérieur) a été ajouté comme témoin réactif de référence. Ces matériaux ont subi toute une série d'essais et d'analyses en laboratoire afin d'en évaluer le potentiel de réactivité alcaline dans le béton: 1) analyse chimique; 2) examen pétrographique; 3) méthode chimique ASTM C289; 4) méthode chimique modifiée (sur résidu insoluble); 5) essai sur mortier ASTM C227; 6) essai accéléré sur mortier ASTM C9-P214 (dit «sud-africain»); 7) essai sur mortier à l'autoclave (méthode Laval/MTQ); 8) essai sur béton ACNOR A23.2-14A; 9) essai sur béton ACNOR modifié (410 kg/m³ de ciment au lieu de 310); 10) essai accéléré sur béton (méthode «sud-africaine»), et 11) essai de production de gel («gel pat test»).

Tous les essais précédents ont montré certaines lacunes, s'avérant trop permissifs (n^{os} 3, 8), trop sévères (n^{os} 4, 6, 7, 9, 10), inconsistants (n^o 5) ou peu convaincants (n^{os} 1, 2, 11). Somme toute, les matériaux à l'étude ont été évalués sur la base des cinq essais suivants: 1) mortier accéléré ASTM C9-P214 (norme d'acceptation seulement, de 0,15% à 14 jours); 2) mortier à l'autoclave (norme d'acceptation seulement, de 0,15% à 5 heures); 3) béton ACNOR (norme de refus seulement, de 0,04% mais à 18 mois au lieu de un an); 4) béton ACNOR modifié (norme d'acceptation seulement, de 0,04% à un an), et 5) mortier ASTM C227 (norme d'acceptation avec réserve et norme de refus, de 0,05% à six mois, lorsque les essais précédents n'étaient pas concluants).

Sur ces bases, tous les sables et graviers du Grenville et du Supérieur québécois ont été classés non réactifs, à l'exception d'un sable du Grenville, alors que seulement la moitié environ des sables et graviers des Appalaches se sont classés non réactifs, dont plusieurs avec réserve. Les granulats du Grenville et du Supérieur québécois sont constitués à plus de 85% de roches granitoïdes (granite, diorite, gneiss granitique...), alors que ceux des Appalaches contiennent surtout des roches sédimentaires (calcaire, grès, grauwacke, quartzite...) et certaines quantités de schistes. Les graviers de la Gaspésie se distinguent par leur contenu élevé en particules

calcaires. Mentionnons que les essais sur béton n'ont été effectués que sur les graviers, et ce en présence d'un sable non réactif. La combinaison des deux granulats d'une même source, surtout dans le cas des Appalaches, aurait probablement fourni des expansions plus élevées que celles obtenues. Les évaluations effectuées au terme du projet pourraient donc s'avérer encore trop généreuses pour certaines des sources étudiées qui, dans la pratique, produisent toutes à la fois les deux types de granulats à béton.

Un organigramme décisionnel est proposé pour l'évaluation du potentiel de RAG des granulats naturels du Québec. Cet organigramme rappelle d'abord et avant tout qu'un granulats réactif peut être utilisé dans un ouvrage non exposé à l'humidité et que des résultats de laboratoire ne peuvent en aucun cas remplacer les renseignements obtenus sur la performance en service des granulats, lorsque ceux-ci sont disponibles. Quoique limités dans le cas des granulats naturels du Québec, ces informations montrent que ces matériaux présentent une bien meilleure performance globale que les calcaires des Basses-Terres du Saint-Laurent et les schistes à chlorite de la région de Sherbrooke, par exemples. Lorsque les renseignements sur la performance en service sont, pour différentes raisons, non disponibles, insuffisants ou non convaincants, on n'a pas d'autre choix que de procéder à des essais en laboratoire. Sur la base des résultats obtenus dans cette étude, nous ne recommandons que quatre essais: l'examen pétrographique (optionnel), l'essai accéléré sur mortier ASTM C 9-P214 (comme norme d'acceptation) ou l'essai sur mortier à l'autoclave (comme norme d'acceptation), et l'essai sur béton ACNOR modifié, en utilisant toutefois un dosage en ciment de quelque 365 kg/m^3 (comme norme d'acceptation et de refus). Un tel essai modifié est recommandé aussi bien pour tester un gravier (avec un sable non réactif) qu'un sable (avec un gros granulats non réactif) ou un mélange sable/gravier particulier. Cette dernière option est fortement recommandée dans le cas de sources fournissant à la fois les deux types de granulats.

Au début du projet, nous avons prévu que seraient effectués certains travaux d'inspection des structures en béton fabriquées avec les granulats naturels du Québec. Ce volet n'a malheureusement pu être mené à bien. Ce manque d'information concernant la performance en service de ces matériaux laisse encore planer un certain doute sur leur véritable potentiel de réactivité dans le béton. L'inspection des structures fabriquées avec des graviers naturels, couplée aux résultats de cette étude, permettrait toutefois d'apporter encore plus de certitude sur la réactivité de ces matériaux de même que sur la méthodologie à suivre quant à l'évaluation de cette réactivité en laboratoire.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
1. INTRODUCTION	1
1.1 Problématique à l'origine du projet	1
1.2 Objectifs de l'étude	5
1.3 Méthodologie	6
2. NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS ET DESCRIPTION DES ESSAIS EFFECTUÉS DANS CETTE ÉTUDE	7
2.1 Généralités sur les réactions alcalis-granulats	7
2.1.1 Conditions essentielles ou favorables aux réactions alcalis-granulats	7
2.1.2 Types de réactions et mécanismes d'expansion	8
2.1.3 Indices de réactivité alcalis-granulats	10
2.2 Géologie et disparités régionales	11
2.3 Caractérisation du potentiel de RAG des granulats: performance en service	13
2.4 Caractérisation en laboratoire du potentiel de RAG des granulats	14
2.4.1 Échantillonnage	14
2.4.2 Généralités sur les essais de caractérisation	14
2.4.3 Examen pétrographique ASTM C295	15
2.4.4 Méthode chimique ASTM C289	16
2.4.5 Méthode chimique modifiée (ASTM C289 sur résidus insolubles)	17
2.4.6 Essai de production de gel («gel pat test»)	18
2.4.7 Essai du prisme ou du cylindre de roche ASTM C586	19
2.4.8 Essai de la barre de mortier ASTM C227	20
2.4.9 Essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-Proposal-P214 (dit «sud-africain»)	20
2.4.10 Essai de la barre de mortier à l'autoclave (méthode Laval/MTQ)	21
2.4.11 Essai du prisme de béton ACNOR CAN3-A23.2-14A	22
2.4.12 Essai modifié du prisme de béton ACNOR	24
2.4.13 Essai accéléré du prisme de béton (méthode «sud-africaine»)	24

3. ÉCHANTILLONNAGE, PRÉPARATION DES MATÉRIAUX ET PROGRAMME D'ESSAIS	27
3.1 Sélection des sources	27
3.2 Géologie et échantillonnage	27
3.3 Préparation des échantillons	29
3.4 Programme d'essais	29
3.4.1 Composition des matériaux	29
3.4.2 Évaluation du potentiel de réactivité alcaline dans le béton	32
3.4.3 Caractéristiques physiques et performance mécanique	32
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	37
4.1 Composition chimique et pourcentage de résidus insolubles	37
4.2 Examen mégascopique et composition pétrographique	42
4.3 Examen pétrographique microscopique	48
4.4 Essai de production de gel («gel pat test»)	50
4.5 Essais de la méthode chimique ASTM C289 et de la méthode chimique modifiée (ASTM C289 sur résidus insolubles)	52
4.6 Essai de la barre de mortier ASTM C227	55
4.7 Essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-Proposal-P214 (dit «sud-africain»)	63
4.8 Essai de la barre de mortier à l'autoclave (méthode Laval/MTQ)	69
4.9 Essai du prisme de béton ACNOR CAN3-A23.2-14A	69
4.10 Essai modifié du prisme de béton ACNOR	76
4.11 Essai accéléré du prisme de béton (méthode «sud-africaine»)	79
4.12 Évaluation de la performance des essais de réactivité alcaline	82
4.13 Évaluation globale du potentiel de RAG des granulats étudiés	87
4.13.1 Évaluation des graviers	87
4.13.2 Évaluation des sables	89
4.13.3 Comparaison entre les sables et les graviers de même provenance	90
4.13.4 Sommaire et conclusion sur l'évaluation des granulats	90
5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	93
5.1 Les essais de réactivité alcaline	93
5.2 Méthodologie proposée pour la caractérisation du potentiel de RAG des granulats naturels	93
5.3 Mises en garde quant aux résultats obtenus	96
5.4 Mesures de prévention	97
6. RÉFÉRENCES	101
ANNEXE A: Sommaire des informations recueillies sur le site des exploitations visitées	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Résultats d'essais de réactivité alcaline sur des graviers du Québec effectués en 1987.	3
Tableau 2	Variétés de silice potentiellement réactives dans le béton et exemples québécois.	9
Tableau 3	Roches siliceuses déjà reconnues comme réactives dans le béton.	10
Tableau 4	Essais de réactivité alcaline en usage au Québec.	15
Tableau 5	Résultats de l'analyse granulométrique des sables.	33
Tableau 6	Résultats des essais physico-mécaniques sur les graviers.	34
Tableau 7	Résultats des essais physico-mécaniques sur les sables.	35
Tableau 8	Résultats de l'analyse chimique des graviers.	38
Tableau 9	Résultats de l'analyse chimique des sables.	39
Tableau 10	Composition du ciment utilisé pour les essais sur mortier et sur béton.	43
Tableau 11	Caractéristiques pétrographiques des échantillons de gravier et résultats de l'essai de production de gel.	44
Tableau 12	Résultats des essais de la méthode chimique normalisée ASTM C289 et de la méthode chimique modifiée.	53
Tableau 13	Résultats de l'essai de la barre de mortier ASTM C227 sur les graviers.	58
Tableau 14	Résultats de l'essai de la barre de mortier ASTM C227 sur les sables.	59
Tableau 15	Résultats de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 sur les graviers.	64
Tableau 16	Résultats de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 sur les sables.	65
Tableau 17	Résultats de l'essai de la barre de mortier à l'autoclave.	70
Tableau 18	Résultats de l'essai du prisme de béton ACNOR CAN3-A23.2-14A.	73
Tableau 19	Résultats de l'essai modifié du prisme de béton ACNOR.	77
Tableau 20	Résultats de l'essai accéléré du prisme de béton.	80
Tableau 21	Sommaire des résultats obtenus pour les graviers.	83
Tableau 22	Sommaire des résultats obtenus pour les sables.	84

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Localisation des sources échantillonnées.	28
Figure 2	Préparation des échantillons de gravier et programme d'essais et d'analyses	30
Figure 3	Préparation des échantillons de sable et programme d'essais et d'analyses.	31
Figure 4	Diagramme ternaire SiO ₂ - Al ₂ O ₃ - Carbonates des graviers.	40
Figure 5	Diagramme ternaire SiO ₂ - Al ₂ O ₃ - Carbonates des sables.	41
Figure 6	Diagramme ternaire Roches quartzzeuses - Granitoïdes - Calcaires des graviers. Les roches quartzzeuses comprennent le grès, le grauwacke et la quartzite. Les faciès granitoïdes comprennent les roches ignées intrusives (granite, diorite, etc.) et leurs équivalents métamorphiques (gneiss, etc.).	46
Figure 7	Cotes attribuées aux graviers lors de l'examen pétrographique en lames minces quant à leur potentiel de réactivité alcaline dans le béton (1: faible à nul; 2: moyen; 3: élevé).	49
Figure 8	Cotes attribuées aux graviers lors de l'essai de production de gel (1: non réactif; 2: marginalement réactif; 3: réactif).	49
Figure 9	Résultats des essais chimiques normalisé (ASTM C289) et modifié (ASTM C289 sur résidus insolubles) pour les graviers (A) et les sables (B).	54
Figure 10	Comparaison entre les valeurs corrigées de silice dissoute (Sc*) obtenues pour les sables et les graviers lors de l'essai chimique modifié (Sc* = Sc x % résidus insolubles/100).	56
Figure 11	Résultats de l'essai de la barre de mortier ASTM C227 pour les graviers. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.	60
Figure 12	Résultats de l'essai de la barre de mortier ASTM C227 pour les sables. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.	61
Figure 13	Comparaison entre les résultats obtenus à six mois pour les sables et les graviers lors de l'essai de la barre de mortier ASTM C227.	62
Figure 14	Résultats de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 pour les graviers. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.	66
Figure 15	Résultats de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 pour les sables. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.	67
Figure 16	Comparaison entre les résultats obtenus à 14 jours pour les sables et les graviers lors de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214.	68
Figure 17	Résultats de l'essai de la barre de mortier à l'autoclave pour les graviers (A) et les sables (B).	71
Figure 18	Comparaison entre les résultats obtenus pour les sables et les graviers lors de l'essai de la barre de mortier à l'autoclave.	72

Figure 19	Résultats de l'essai du prisme de béton ACNOR CAN3-A23.2-14A. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.	74
Figure 20	Résultats de l'essai modifié du prisme de béton ACNOR. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.	78
Figure 21	Résultats de l'essai accéléré du prisme de béton. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.	81
Figure 22	Cotes globales accordées aux graviers (A) et aux sables (B) quant à leur potentiel de réactivité alcaline dans le béton.	88
Figure 23	Organigramme de caractérisation du potentiel de réactivité alcaline applicable aux sables et aux graviers testés, à deux exceptions près: le sable P, expansif aux essais sur mortier ASTM C227 et C9-P214, a été classé réactif, mais avec réserve, considérant sa bonne performance à l'essai sur mortier à l'autoclave (?); le sable G, non expansif aux essais sur mortier ASTM C227 et C9-P214, a été classé non réactif, mais avec réserve, considérant sa mauvaise performance à l'essai sur mortier à l'autoclave (?).	91
Figure 24	Organigramme proposé pour l'évaluation du potentiel de réactivité alcaline, dans le béton de ciment, des sables et graviers naturels du Québec.	94
Figure 25	Organigramme proposé pour l'utilisation, dans le béton de ciment, des sables et graviers naturels classés réactifs ou réactifs avec réserve.	98

INTRODUCTION

1.1 PROBLÉMATIQUE À L'ORIGINE DU PROJET

Les réactions alcalis-granulats provoquent l'expansion et la détérioration précoce du béton. Depuis que le phénomène a été décelé pour la première fois, au début des années 40, dans un barrage de Californie, il a été observé dans presque toutes les parties du monde. Malheureusement, le Québec est loin d'avoir été épargné. Même si la prise de conscience du problème est beaucoup plus récente chez nous, sans doute parce que la très grande majorité de nos ouvrages en béton sont relativement jeunes, plusieurs d'entre eux sont affectés, ce qui a eu pour conséquence de soulever une certaine inquiétude dans l'industrie du béton.

Le réseau routier du Québec, en particulier, comprend quelque 7 000 ponts et viaducs, et plusieurs tronçons d'autoroutes comportent également des chaussées en béton de ciment. Plusieurs de ces composantes montrent présentement des signes de détérioration par des réactions alcalis-granulats, ci-après appelées «RAG», et il est à prévoir que leur nombre ira en grandissant. En effet, notre réseau routier est relativement jeune, alors que les RAG mettent normalement plusieurs années, voire même plusieurs décennies, à se manifester. Dans un avenir plus ou moins rapproché, le ministère des Transports du Québec devra réparer ou même reconstruire plusieurs composantes en béton de notre réseau routier, détériorées ou non par des RAG. Au moment de ces travaux, il lui faudra éviter d'utiliser des granulats réactifs, à moins d'y apporter les correctifs appropriés.

Devant l'urgence et la gravité de la situation, de nombreux travaux ont dû être effectués au Québec au cours des dix dernières années sur le sujet (Bérubé et al. 1990). Ces travaux ont principalement porté sur: (1) la caractérisation en laboratoire du potentiel de réactivité alcaline de nos granulats, ceci impliquant l'évaluation et l'amélioration d'essais existants, de même que la mise au point de nouveaux essais, le tout afin de pouvoir caractériser plus fidèlement ou plus rapidement nos granulats (volet «caractérisation») (Bérubé & Fournier 1990, 1992, Bérubé et al. 1992a, 1992b); (2) l'évaluation sur le terrain, par le MTQ, de ce potentiel par l'inspection systématique des ouvrages en béton de plusieurs régions du Québec (volet «inspection») (Bérubé et al. 1988, 1990, Vézina & Fournier 1989); (3) la mise sur pied, également par le MTQ, d'un inventaire du potentiel de réactivité de nos granulats, basé sur les travaux

précédents (volet «inventaire») (Bérubé et al. 1990, Vézina & Fournier 1989), et (4) les mesures à prendre en présence de granulats réactifs (volet «prévention») (Bérubé et al. 1990, Bérubé & Duchesne 1992a, 1992b, Duchesne & Bérubé 1992a, 1992b).

La plupart des travaux de caractérisation et d'inventaire ont toutefois porté sur les granulats calcaires et dolomitiques produits par les carrières des Basses-Terres du Saint-Laurent (Fournier & Bérubé 1991a, Fournier 1992). Quelques investigations ont également porté sur les granulats silicatés de carrières (Ouellet 1988, Bérubé & Fournier 1990, 1992). Malheureusement, très peu de travaux avaient été effectués jusqu'alors relativement à la réactivité des graviers naturels, abondamment utilisés dans toutes les régions du Québec jusque vers le milieu des années 50, (avant de céder du terrain aux granulats de carrières), et encore grandement utilisés dans certaines parties de la province, en particulier dans les Appalaches (Estrie, Beauce, Bas-Saint-Laurent et Gaspésie) et en Abitibi.

En Ontario, des graviers lithiques (c'est-à-dire contenant plusieurs variétés de roches) de la région de Sudbury ont déjà révélé qu'ils posaient problème dans le béton (Grattan-Bellew & Rogers 1985, Magni et al. 1987). Le même type de dépôts se retrouverait dans le Nord-Ouest québécois (Grattan-Bellew, CNRC, comm. pers.), où au moins un ouvrage en béton fabriqué avec des graviers naturels, soit un barrage, a déjà été reconnu comme atteint de RAG (Bérard & Roux 1986, Bérubé et al. 1990). Dans les Maritimes, des graviers naturels ont aussi généré des problèmes dans des ouvrages en béton (DeMerchant & Soles 1990, Gervais et al. 1990). Ces graviers sont majoritairement constitués de roches des Appalaches, tout comme ceux de l'Estrie, de la Beauce, du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie. Le MTQ n'a pas encore procédé à l'inspection systématique des ouvrages en béton fabriqués avec des graviers naturels, mais on peut d'ores et déjà dénombrer au Québec (en Estrie, dans le Bas-Saint-Laurent, en Gaspésie et même en Abitibi) quelques barrages construits avec de tels matériaux et montrant effectivement des signes de détérioration par des RAG (Bérard & Roux 1986, Bérubé et al. 1990).

D'autre part, les essais normalisés alors préconisés pour détecter les granulats réactifs ne permettaient pas d'évaluer avec certitude le potentiel de réactivité des graviers et sables naturels, particulièrement dans le cas des graviers lithiques, les plus susceptibles de réactivité. À l'occasion de travaux antérieurs effectués à l'Université Laval, nous avons testé un certain nombre de graviers granitiques de la Côte-Nord et de graviers lithiques de l'Estrie/Beauce (Bérubé et al. 1987, Ouellet 1988). Les résultats sont résumés au Tableau 1.

TABLEAU 1.

Résultats d'essais de réactivité alcaline sur des graviers du Québec effectués en 1987¹.

ESSAI	SABLES (2) ET GRAVIERS (2) GRANITIQUES	SABLES (4) ET GRAVIERS (4) LITHIQUES
Examen pétrographique	Non réactifs	Potentiellement réactifs
Méthode chimique ASTM C289	Non réactifs [1 seul sable et 1 seul gravier testés]	Non réactifs [1 seul sable et 1 seul gravier testés] (interférence de la part des carbonates?) ²
Méthode chimique modifiée (sur résidu insoluble)	Non réactifs	Sables non réactifs mais graviers réactifs (effet concassage?)
Barre de mortier ASTM C227	Non réactifs (effets alcalis et contenants?)	Non réactifs (effets alcalis et contenants?)
Barre de mortier accélérée (essai «sud-africain») (NaOH 1N à 80°C)	Non réactif [1 seul sable testé]	Réactif [1 seul sable testé] (essai souvent sévère?)
Prisme de béton ACNOR A23.2-14A	Non réactifs (mélanges à seulement 1,08% Na ₂ O éq.?)	Non réactifs (mélanges à seulement 1,08% Na ₂ O éq.?) ³

1 Tous les résultats sont tirés de Bérubé et al. (1987), sauf ceux de l'essai de la méthode chimique normalisée ASTM C289 et de l'essai accéléré de la barre de mortier (Ouellet 1988).

2 Les remarques entre parenthèses sont discutées au chapitre 2.

3 Les graviers lithiques de Sudbury, posant pourtant problème dans le béton en service, réussissent également cet essai (Rogers 1990), même avec un contenu en alcalis de 1,25% Na₂O éq. (par rapport au ciment).

Tous les essais effectués à cette occasion ont été très positifs en ce qui concerne les sables et graviers granitiques, ce qui ne laissait planer aucun doute sur leur performance en service (Bérubé et al. 1987, Ouellet 1988). Par contre, dans le cas des graviers lithiques, les résultats obtenus étaient inconsistants et très difficiles à interpréter. Malgré le petit nombre d'échantillons testés, ceux-ci s'en sortaient fort bien à l'essai normalisé de la méthode chimique ASTM C289 (Ouellet 1988), mais on savait déjà que la présence de carbonates, habituellement en quantités significatives dans ces graviers, pouvait avoir joué en leur faveur (réaction des carbonates avec la silice dissoute et précipitation de cette silice) (Fournier & Bérubé 1990, Bérubé & Fournier 1990, 1992). Par ailleurs, les graviers lithiques, concassés pour l'essai de la méthode chimique modifiée (c'est-à-dire ASTM C289 sur le résidu insoluble), se montraient tous réactifs à cet essai, alors que les sables de même provenance, testés au même moment mais simplement

tamisés pour l'essai, le passaient tous (Bérubé et al. 1987). Un effet de concassage (non subi par les sables) pouvait donc expliquer la réactivité de certains graviers (Bérubé & Fournier 1990, 1992). Tous les graviers testés, granitiques ou lithiques, donnaient des résultats satisfaisants à l'essai de la barre de mortier ASTM C227, mais les essais avaient été réalisés avec un ciment de teneur en alcalis de 1,08% Na₂O éq. et en utilisant des contenants dont les parois étaient recouvertes de ratine de coton. Or, après le démarrage de nos essais, soit en décembre 1986, l'annexe B de la norme ACNOR A23.1 a été révisée: on recommandait alors d'augmenter la teneur en alcalis du ciment à 1,25% Na₂O éq. par une addition de NaOH à l'eau de gâchage, alors que des essais réalisés par la suite ont démontré la très grande influence de la teneur en alcalis sur le résultat de l'essai (Bérubé & Fournier 1989). D'autre part, une autre étude a cette fois démontré que la présence d'un matériau absorbant sur les parois des contenants utilisés pour l'essai ASTM C227 avait pour effet de provoquer un important lessivage des alcalis des barres de mortier, le tout résultant en des expansions nettement trop faibles (Rogers & Hooton 1989). Dans de telles conditions, même les granulats canadiens les plus réactifs satisfaisaient à la norme (Bérubé et al. 1989a, Bérubé & Fournier 1990, 1992). On pouvait donc douter de tout résultat favorable aux granulats testés. D'autre part, le seul granulats lithique alors testé à l'essai accéléré de la barre de mortier, essai alors dit «sud-africain» mais devenu depuis une norme provisoire de l'ASTM (C9-P214), était classé expansif à cet essai (Ouellet 1988), lequel se montrait par ailleurs souvent trop sévère pour de nombreux granulats non problématiques (Bérubé & Fournier 1989, 1990). Toutefois, tous les graviers lithiques alors testés réussirent l'essai du prisme de béton ACNOR A23.2-14A (Bérubé et al. 1987), considéré par tous comme le plus réaliste des essais de réactivité alcaline. Mentionnons toutefois que les essais avaient été réalisés en utilisant un ciment de 1,08% Na₂O eq. sans autre addition d'alcalis, alors que la norme ACNOR avait été modifiée après le démarrage des essais, soit en décembre 1986, exigeant plutôt l'augmentation de la teneur en alcalis du ciment à 1,25% Na₂O éq., par une addition de NaOH à l'eau de gâchage. Or, certaines expériences plus récentes indiquaient en effet que la teneur en alcalis, tout comme pour l'essai sur mortier ASTM C227, pouvait avoir une très forte influence sur le résultat de l'essai ACNOR (Bérubé & Fournier 1989, 1990, 1992). Par exemple, des tufs rhyolitiques très réactifs de la région de Beauceville, fort problématiques dans le barrage Sartigan, situé à Saint-Georges, passaient la norme ACNOR avec une teneur en alcalis de 1,08% (expansion <0,04% à un an), alors qu'une expansion quatre fois supérieure à la norme (0,167%) était obtenue avec une teneur de 1,25% d'alcalis (Bérubé et al. 1989a, Bérubé & Fournier 1990, 1992). Par ailleurs, on savait aussi que des graviers lithiques de la région de Sudbury, pour leur part déjà convaincus de réactivité alcaline dans le béton en service (Magni et al. 1987),

réussissaient également l'essai ACNOR (Rogers 1990), même avec une teneur de 1,25% Na₂O éq. (par rapport au ciment)!

Au moment de la mise en oeuvre du projet, on pouvait ainsi résumer la situation: (1) des graviers naturels (granitiques mais surtout lithiques) sont abondamment utilisés comme granulats à béton dans certaines régions du Québec; (2) très peu de travaux avaient été réalisés jusque là sur ce type de matériaux, aussi bien aux points de vue caractérisation en laboratoire que performance dans les ouvrages en service; (3) toutefois, malgré l'absence d'inspection systématique des structures construites avec de tels granulats, on savait déjà que certaines d'entre elles, à tout le moins, présentaient des signes évidents de réactivité alcalis-granulats; (4) d'autre part, les essais de réactivité alcaline alors préconisés ne semblaient pas pouvoir rendre compte du véritable potentiel de réactivité des graviers naturels; (5) en définitive, un fort doute subsistait donc sur la qualité de ces matériaux et il importait de clarifier au plus tôt la situation. C'est essentiellement ce que visait le projet de recherche proposé.

1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'analyse détaillée en laboratoire d'échantillons de sables et de graviers à béton provenant d'une vingtaine de sources géologiquement, géographiquement et économiquement représentatives des gravières du Québec, couplée à l'inspection des structures en béton construites avec de tels granulats, devait nous permettre d'atteindre les objectifs suivants:

- 1) Déterminer le véritable potentiel de réactivité alcaline des sables et graviers naturels exploités comme granulats à béton par un certain nombre d'exploitations représentatives de l'ensemble des gravières québécoises.
- 2) Vérifier le comportement de ces matériaux aux différents essais de réactivité alcaline alors normalisés, proposés ou en cours d'étude.
- 3) Suggérer les essais les plus utiles afin de déterminer de manière fiable et rapide le potentiel de réactivité alcaline des granulats naturels et proposer une méthodologie afin d'y arriver (sous forme d'organigramme décisionnel).
- 4) Faire des recommandations sur l'utilisation des matériaux produits par chacune des exploitations sélectionnées pour l'étude.
- 5) Contribuer à l'inventaire du MTQ sur le potentiel de RAG des granulats québécois.

1.3 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie choisie pour nous permettre d'atteindre nos objectifs, comportait les étapes suivantes:

- 1) Sélection d'une vingtaine de sources représentatives des granulats naturels du Québec.
- 2) Géologie et échantillonnage de ces sources.
- 3) Préparation des échantillons recueillis pour les essais.
- 4) Analyse de la composition chimique et pétrographique des échantillons.
- 5) Essais de réactivité alcaline.
- 6) Inspection de structures construites avec les granulats à l'étude.

La dernière étape n'a malheureusement pu être réalisée, ce qui, nous le verrons plus loin, nuira quelque peu à l'interprétation des résultats obtenus.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS ET DESCRIPTION DES ESSAIS EFFECTUÉS DANS CETTE ÉTUDE

2.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS

Les réactions alcalis-granulats provoquent l'expansion et la détérioration précoce du béton. Ce sont des réactions chimiques qui se produisent entre la solution interstitielle du béton, fortement basique ($\text{pH} \geq 12,5$) et alcaline, et certaines phases minérales présentes dans les granulats. Les alcalis proviennent principalement du ciment, mais certaines quantités peuvent également être fournies par des phases minérales contenues dans les granulats (feldspaths altérés, micas, minéraux argileux...), par des additions minérales (fumées de silice, cendres volantes, laitiers de hauts-fourneaux...), les adjuvants (superplastifiants...), l'eau de gâchage, de même que par d'autres sources externes (eau de mer, sels déglaçants...). Précisons que ce sont avant tout les ions OH^- en solution (déterminant le pH) qui sont agressifs envers les granulats. Toutefois, une plus grande quantité d'ions alcalins (K^+ , Na^+) exige la mise en solution d'ions OH^- à partir de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de la pâte de ciment, cela afin de conserver l'équilibre des charges en solution.

2.1.1 Conditions essentielles ou favorables aux réactions alcalis-granulats

Trois conditions doivent être réunies pour que des réactions alcalis-granulats se développent dans un béton: (1) bien sûr, le granulat doit être réactif; (2) la concentration en alcalis doit être élevée dans la solution interstitielle du béton (favorisant un pH élevé), et (3) les conditions d'humidité relative doivent être élevées, en moyenne d'au moins 80-85% selon plusieurs études. Mentionnons toutefois que l'humidité présente dans le sol, même au-dessus de la nappe phréatique, peut être suffisante pour que des RAG se développent dans un béton en contact avec le sol.

Les cycles de mouillage/séchage (pluies, marées, niveaux variables en amont des barrages...) tendent également à accélérer la détérioration superficielle du béton atteint de RAG (motif de fissuration polygonal ou autre), en générant dans les quelque premiers centimètres du béton des conditions relativement moins propices aux réactions (humidité plus faible par temps sec,

lessivage des alcalis par la pluie) qu'au sein de la masse. En conséquence, ce béton superficiel se fissurera par tension sous la poussée du béton expansif sous-jacent (Bérubé & Fournier 1991). Pour leur part, les cycles de gel/dégel contribuent à accélérer la détérioration, une fois la microfissuration amorcée par les RAG. L'exposition à l'eau de mer de même que l'application de sels déglacants fournit au béton des alcalis supplémentaires, ce qui risque dans certains cas de provoquer les réactions ou à tout le moins de les accélérer. Enfin, il n'est pas exclus que les champs magnétiques et les courants électriques générés par les lignes à haute tension ou par la protection cathodique, tendent à favoriser les réactions alcalis-granulats (Natasaiyer & Hover 1987).

2.1.2 Types de réactions et mécanismes d'expansion

On distingue deux principaux types de réactions alcalis-granulats: (1) la réaction alcalis-carbonate et (2) la réaction alcalis-silice. Elles ont en commun un certain nombre de particularités, mais sont foncièrement différentes aux points de vue des mécanismes de réaction et de la nature des phases réactives en jeu. La réaction alcalis-carbonate s'est jusqu'ici limitée à des calcaires dolomitiques argileux de la région de Kingston (Ontario). On attribue la fissuration du béton à la décomposition de cristaux de dolomite (en calcite et brucite) disséminés dans la fine matrice de ces granulats, et aux pressions exercées par le gonflement ultérieur des minéraux argileux contenus dans ces cristaux de dolomite ou qui sont à leur proximité (Swenson & Gillott 1964).

La réaction alcalis-silice, de loin la plus répandue, implique diverses variétés de silice. Selon le degré de réactivité des phases, on la subdivisait parfois antérieurement en «alcalis-silice (classique)» et en «alcalis-silice/silicate à expansion tardive» (Rogers 1990), mais cette différenciation tend à disparaître. De façon générale, la silice est chimiquement instable dans un milieu à pH élevé. Les variétés pauvrement ordonnées, hydratées et plus poreuses (opale, verre volcanique...), ou encore moins stables aux conditions normales (tridymite, cristobalite...) réagissent toutefois plus rapidement. Certaines variétés de quartz sont également réactives, mais à un degré moindre: des variétés cryptocristallines (calcédoine, chert...), microcristallines (ciments siliceux sédimentaires, verre volcanique dévitrifié, schistes et phyllades...), et même cristallines et granulaires mais ayant subi des contraintes mécaniques ou métamorphiques ou contenant un grand nombre de pores et/ou d'inclusions (ciment sédimentaire recristallisé, quartz à extinction roulante ou à joints suturés...). Les phases siliceuses réactives dans le béton sont listées au tableau 2 selon un ordre normalement décroissant de réactivité. Les roches correspondantes sont fort nombreuses et peuvent être aussi bien d'origine ignée que

sédimentaire ou métamorphique. On en trouvera une liste non exhaustive au tableau 3. Mentionnons toutefois que Grattan-Bellew (1987) remet en question la réactivité des grains de quartz à extinction roulante, suggérant que la réactivité des roches contenant du quartz fortement roulant ou du quartz roulant en abondance serait plutôt attribuable à la coexistence de quartz microcristallin.

TABLEAU 2

Variétés de silice potentiellement réactives dans le béton et exemples québécois.

Variétés de silice	Exemples québécois
<p><u>Variétés très réactives</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pauvrement cristallisées: opale, verre volcanique... • Métastables: cristobalite, tridymite. 	
<p><u>Quartz potentiellement réactif</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Cryptocristallin: calcédoine, chert... • Microcristallin: <ul style="list-style-type: none"> - réseau siliceux de certains calcaires - verre volcanique dévitrifié - autres types de quartz microcristallin: (métamorphique, ciments sédimentaires...) • Ciments sédimentaires recristallisés. • Granulaire à extinction roulante, à joints suturés ou criblé de microinclusions. 	<p>Calcaires des Basses-Terres du Saint-Laurent</p> <p>Calcaires des Basses-Terres du Saint-Laurent Tufs rhyolitiques (Beauce)</p> <p>Schistes et phyllades (Estrie) Graviers lithiques (Appalaches)</p> <p>Grès de Potsdam (Basses-Terres)</p> <p>Gneiss, granites, graviers... (Barrages: Abitibi, Mauricie, Laurentides...)</p>

La réaction alcalis-silice génère des produits de composition silico-calco-alkaline (gels et produits microcristallins). La fissuration et l'expansion du béton résultent du gonflement, par absorption de solution, des gels hydrophyles produits à la périphérie, dans tout le volume (granulats poreux) ou le long de microfissures préexistantes au sein des particules du granulat, ceci provoquant le gonflement de ces particules, l'application de fortes pressions sur la pâte de ciment avoisinante, la création de microfissures dans la pâte de ciment, et donc l'expansion du béton. Les pressions exercées au sein du béton atteindraient 6 à 7 MPa (Diamond 1989), alors que la résistance de la pâte de ciment en traction est d'environ 3 MPa pour les bétons usuels.

TABLEAU 3

Roches siliceuses déjà reconnues comme réactives dans le béton.

Types de roches	Variétés de roches
<p><u>Roches considérées très réactives</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sédimentaires à opale • Volcaniques avec amygdules remplies d'opale, de tridymite ou de cristobalite 	<p>Certains shales, grès, cherts et calcaires silicifiés; roches volcaniques à matrice vitreuse: rhyolites à basaltes et équivalents pyroclastiques (tufs...)</p> <p>Basaltes, andésites...</p>
<p><u>Potentiellement réactives à quartz</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Très riches en silice (95%) • Volcaniques à métavolcaniques à matrice dévitrifiée (quartz microcristallin) • Calcaires siliceux à résidu insoluble riche en quartz micro à cryptocristallin • Roches diverses à quartz cryptocristallin, microcristallin ou granulaire 	<p>Cherts à calcédoine ou à quartz microcristallin, veines de quartz, quartzites, grès quartzitiques...</p> <p>Roches volcaniques: rhyolites à basaltes et équivalents pyroclastiques (tufs...)</p> <p>Calcaires sédimentaires</p> <p>Argillites, siltstones, grès, grauwackes, ardoises, phyllades, schistes à quartz et chlorite, gneiss granitiques...</p>

2.1.3 Indices de réactivité alcalis-granulats

Un béton atteint de RAG peut ressembler à un béton endommagé par l'attaque des sulfates ou par retrait au séchage, de sorte qu'un examen minutieux des structures détériorées s'impose, doublé d'un certain nombre de vérifications en laboratoire. De façon générale, les réactions alcalis-granulats s'accompagnent des phénomènes suivants:

- Expansion du béton: déformation, extrusion de scellants de joints, fermeture de joints d'expansion ou de construction avec éclatement du béton, décollement d'éléments structuraux, mouvements différentiels, blocage de vannes, de turbines, etc.
- Motif de fissuration à la surface du béton, très souvent polygonal («map-cracking»). Sous contrainte (aciers d'armature, précontraintes ou postcontraintes...), les fissures tendent à s'orienter selon les contraintes majeures.

- Produits de réaction (gels amorphes et produits microcristallins) de composition silico-calco-alcaline qui remplissent des fissures à travers les granulats et la pâte de ciment, de même que des pores du béton, et qui peuvent également se retrouver sous forme d'exsudats à la surface des composantes affectées. La reconnaissance avec certitude de ces produits de réaction exige souvent une analyse plus poussée en laboratoire (indices très caractéristiques d'une réaction alcalis-silice).
- Auréoles foncées dites «de réaction». On en distingue deux types: (1) auréoles de réaction proprement dites à la périphérie de certains granulats réactifs (ex. grès de Potsdam, granites, graviers...); (2) auréoles de déposition constituées de gel siliceux incolore et observées à la périphérie interne de plans de fissures préexistantes à travers certains granulats réactifs (ex. calcaires, phyllades...). Cette auréole est très souvent accompagnée de dépôts blanchâtres constitués de microcristaux lamellaires en forme de rosettes microscopiques qui recouvrent en tout ou en partie la zone intérieure des plans de fissure des granulats (Bérubé & Fournier 1986). Certains granulats montrent les deux types d'auréoles (ex. tufs rhyolitiques) (indices très caractéristiques d'une réaction alcalis-silice).

Mentionnons que les seuls signes vraiment caractéristiques des réactions alcalis-granulats sont ceux observés lors d'un examen pétrographique. Par ailleurs, lorsqu'on y regarde de très près, par exemple au microscope électronique à balayage, des gels de réaction peuvent être observés en faibles quantités dans la majorité des bétons, endommagés ou non, de sorte qu'on doit éviter de conclure trop rapidement sur cette seule base (Raphaël et al. 1989).

2.2 GÉOLOGIE ET DISPARITÉS RÉGIONALES

On compte trois grands types de roches, chacun regroupant de très nombreuses variétés: (1) les roches ignées (ou magmatiques), intrusives (ex. granite, syénite, diorite, gabbro...) et extrusives ou volcaniques (ex. rhyolite, phonolite, andésite, basalte, tuf, «trap rock»...); (2) les roches sédimentaires (calcaire, dolomie, shale, grès, grauwacke...), et (3) les roches métamorphiques (marbre, quartzite, schiste, gneiss, phyllade...). On retrouve au Québec toutes ces variétés de roches, mais l'examen d'une carte géologique permet de constater qu'elles ne sont pas régulièrement distribuées sur tout le territoire, que l'on peut subdiviser en trois grandes régions: le Plateau Laurentien, les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches. Par ailleurs, les dépôts naturels de sable et de gravier reflètent la nature des roches massives retrouvées à proximité plus ou moins grande. La nature des granulats existants dans une région

donnée, naturels ou élaborés à partir de roches massives, est donc obligatoirement subordonnée à la géologie, d'où des disparités régionales au point de vue de leur composition ainsi que de leur performance globale comme granulats à béton, ceci incluant leur potentiel de réactivité dans le béton.

Le Plateau Laurentien couvre près de 95% du territoire québécois et est constitué d'une grande variété de roches ignées, sédimentaires et métamorphiques. Les roches de type granitoides (granite, diorite..., et gneiss équivalents) prédominent toutefois nettement. Ces roches, de même que des graviers de composition équivalente, constituent donc plusieurs sources de granulats. Là où la géologie est toutefois plus diversifiée, comme en Abitibi, les graviers seront plutôt lithiques, c'est-à-dire composés de fragments de roches diverses. Des roches d'origine métasédimentaire ont également été utilisées localement pour la construction d'ouvrages hydroélectriques.

Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont constituées d'une séquence de roches sédimentaires incluant, de la base au sommet, les groupes de Potsdam (grès), de Beekmantown (grès et dolomies), de Chazy (grès calcaireux, calcaires gréseux et dolomitiques), de Black River (dolomies et calcaires), de Trenton (calcaires), d'Utica (shales), de Lorraine (shales, grès, calcaires) et de Queenston (shales). On y exploite intensément les calcaires et les dolomies du Beekmantown, du Chazy, du Black River et du Trenton. Si ces matériaux sont les plus exploités au Québec comme granulats, c'est qu'ils sont abondants à proximité immédiate des plus grands centres urbains et des plus importantes infrastructures routières, et qu'ils forment des dépôts plus volumineux et physiquement ou mécaniquement plus facilement exploitables que ceux des autres types de roches.

La région des Appalaches comprend la Gaspésie, le Bas Saint-Laurent et l'Estrie-Beauce. Il s'agit d'un assemblable complexe de roches sédimentaires et volcaniques fortement plissées, recoupées ici et là par des roches magmatiques intrusives. Les dépôts de sable et de gravier, de composition lithique très hétérogène, reflètent cette grande diversité.

Les cas les plus connus de réactivité alcalis-granulats au Québec se retrouvent dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Certains grès quartzitiques du groupe de Potsdam ont généré des problèmes à la centrale hydroélectrique de Beauharnois, de même que dans d'autres structures de la voie maritime du Saint-Laurent (Bérard & Roux 1986). De nombreux ouvrages de la région de Trois-Rivières fabriqués avec des granulats calcaires siliceux sont également affectés (Bérard & Roux 1986). Par exemple, certaines sections de l'autoroute 30, à Bécancour, constituées de dalles de béton construites avec de tels granulats, n'avaient même pas encore été

ouvertes à la circulation qu'elles ont dû être partiellement reconstruites (Vézina & Claveau 1983). D'autres calcaires des régions de Montréal (Bérard & Roux 1986) et de Québec (Bérubé et al. 1988, 1989b) font également problème.

Dans les Appalaches, soulignons le cas du barrage Sartigan, dans la Beauce, où l'on trouve des tufs rhyolitiques (Bérubé & Fournier 1987). D'autres cas sont rapportés par Dolar-Mantuani (1983) (roches volcaniques), par Grattan-Bellew (1981a, 1982) (phyllades, schistes chloriteux de la région de l'Estrie) et par Bérard & Roux (1986) (graviers lithiques de l'Estrie, du Bas Saint-Laurent et de la Gaspésie). Plusieurs autres types de roches pourraient aussi poser problème. En effet, des grauwackes, schistes, argillites, phyllades, rhyolites, quartzites, etc. des Appalaches se sont montrés réactifs dans les Maritimes (Duncan et al. 1973, DeMerchant & Soles 1990, Gervais et al. 1990).

Sur le territoire du Plateau Laurentien, des ouvrages hydroélectriques construits avec des graviers naturels ou des roches de type granitoïdes (granites, diorites, quartzites..., et gneiss équivalents) montrent des signes pétrographiques de réactivité alcalis-silice, quoique modestes, associés à du quartz à extinction roulante (Bérard & Roux 1986).

2.3 CARACTÉRISATION DU POTENTIEL DE RAG DES GRANULATS: PERFORMANCE EN SERVICE

Le meilleur test que peut subir un granulats est certes l'inspection des ouvrages qui ont été construits avec ce matériau. Toutefois, ceci ne s'applique qu'aux granulats utilisés à maintes reprises, et ce dans des ouvrages suffisamment riches en alcalis, suffisamment âgés et suffisamment exposés pour que des RAG aient eu le temps ou la possibilité de s'y développer. Malheureusement, plusieurs causes peuvent nous empêcher d'obtenir l'information recherchée: (1) nouvelle source ou source utilisée depuis peu; (2) difficulté de retrouver un nombre suffisant d'ouvrages fabriqués avec les granulats proposés et qui satisfont aux exigences mentionnées; (3) manque d'informations concernant d'autres paramètres qui affectent grandement les réactions, par exemple la teneur en alcalis et le dosage du ciment utilisé, la présence d'additions minérales...; (4) variations des matériaux à la source (changements de niveau d'exploitation, modifications des méthodes d'exploitation: préparation, exploitation sélective, dilution...). Le comportement d'un granulats réactif donné dans un béton dépend aussi d'une foule d'autres facteurs, dont les conditions d'exposition, la qualité et le dosage des autres constituants du béton, la qualité des travaux de mise en oeuvre, etc. En définitive, on n'a souvent pas d'autre choix que d'effectuer des essais en laboratoire sur les granulats proposés.

En raison des compositions et des conditions d'exposition très variables des bétons en service, l'évaluation quantitative du potentiel de RAG des granulats n'est d'ailleurs possible que sur la base d'essais bien contrôlés en laboratoire, qui font que tous les granulats sont soumis au même traitement. Il n'en demeure pas moins que les comportements observés en laboratoire doivent être vérifiés par l'inspection des ouvrages construits avec les granulats testés. C'est d'ailleurs la philosophie qu'a adoptée le ministère des Transports du Québec dans son évaluation des sources (Vézina & Fournier 1989, Bérubé et al. 1988, 1990).

2.4 CARACTÉRISATION EN LABORATOIRE DU POTENTIEL DE RAG DES GRANULATS

2.4.1 Échantillonnage

Le tout doit d'abord débiter par un échantillonnage représentatif de la source ou du lot de granulats que l'on veut évaluer. En carrière, nous recommandons fortement d'échantillonner et d'évaluer ensuite séparément les divers niveaux stratigraphiquement différents ou les divers faciès pétrographiquement distincts, car ils pourraient se comporter très différemment dans le béton. En cours d'exploitation, ces faciès peuvent se retrouver en proportions variables dans les piles de réserve, d'où des performances variables dans le béton. Une étude faciès par faciès ou banc par banc permet d'ailleurs à l'exploitant de mieux planifier l'exploitation de sa propriété (exploitation sélective, dilution...). Mentionnons qu'un échantillonnage représentatif des granulats à étudier est un préalable essentiel à toute investigation.

2.4.2 Généralités sur les essais de caractérisation

Il existe de nombreux essais de réactivité alcaline, plus ou moins rapides, et par ailleurs plus ou moins fiables. Plusieurs sont en usage au Québec (tableau 4). Rappelons d'abord que tous sont des essais accélérés (même un essai d'un an sur béton) et qu'ils ne peuvent donc reproduire exactement les conditions existant dans la nature (état des contraintes, environnement...). En effet, ils doivent tous simuler en un an tout au plus ce qui risque de se produire après de nombreuses années de mise en service. Pour ce faire, au moins une des conditions suivantes doit être modifiée à la hausse: (1) la concentration en alcalis (mortier ou béton à haute teneur en alcalis ou immergé en solution alcaline); (2) la température (38°C, 80°C, autoclave); (3) la pression (autoclave); (4) les conditions d'humidité (100% R.H. ou immersion), et/ou (5) la surface spécifique (réduction des granulats). Mentionnons aussi que les essais les plus rapides

ont tendance à s'écarter davantage des conditions réelles. Si le temps le permet, on devrait donc effectuer un essai sur béton de préférence à tous les autres.

TABLEAU 4

Essais de réactivité alcaline en usage au Québec.

Examen pétrographique ASTM C295 (≥ 1 jr)
Méthode chimique ASTM C289 (2 jrs)
Méthode chimique modifiée (sur résidu insoluble) (2-3 jrs)
Essai de production de gel (Université Laval) (1-2 mois)
Prisme ou cylindre de roche ASTM C586 (1 an)
Barre de mortier ASTM C227 (≥ 6 mois)
Barre de mortier accélérée ASTM C9-P214 (2 sem)
Barre de mortier à l'autoclave (Laval/MTQ) (3 jrs)
Prisme de béton ACNOR CAN3-A23.2-14A (1 an)
Prisme de béton ACNOR modifié (plus de ciment) (1 an)
Prisme de béton accéléré (en usage au Québec) (1 mois)

2.4.3 Examen pétrographique ASTM C295

L'examen pétrographique d'un granulats en lame mince au microscope optique polarisant permet normalement de reconnaître les phases minérales potentiellement réactives. Au besoin, cet examen sera complété par d'autres analyses (ex. analyse des insolubles des calcaires au microscope électronique à balayage sur plaque de roche préalablement polie et attaquée à l'acide, ou par diffraction des rayons X sur le résidu insoluble pulvérulent obtenu après lixiviation acide). Un pétrographe bien au fait du phénomène des RAG peut souvent prévoir le comportement du granulats examiné en se basant sur la performance antérieure de granulats semblables dans les ouvrages en service. L'examen pétrographique pourra alors servir de critère d'acceptation ou même de refus. Dans le moindre doute, il guidera au moins dans le choix des essais à effectuer, en tenant compte de la nature des granulats. Par exemple, certains grès réactifs du groupe de Potsdam passent bien l'essai chimique ASTM C289 de même que l'essai accéléré sur mortier (dit «sud-africain»). Pour ce type de granulats, ces essais ne seront donc pas prescrits par un pétrographe averti. En fait, l'examen pétrographique doit être effectué

avant tout autre essai, sinon un mauvais choix d'essai peut conduire à l'acceptation de mauvais granulats, comme dans le cas qui vient d'être mentionné.

2.4.4 Méthode chimique ASTM C289

Le granulat est réduit sous forme de particules de 150 à 300 μm de diamètre. Un échantillon de 25 g est immergé pendant 24 heures dans une solution de NaOH 1N (25 ml), dans un récipient scellé immergé quant à lui dans un bain d'eau maintenue à 80°C. La solution est alors filtrée et analysée pour son contenu en silice dissoute (Sc) et la réduction d'alcalinité (Rc). Les résultats sont reportés sur un abaque normalisé où trois champs correspondent respectivement à des granulats classés comme inoffensifs, réactifs et potentiellement réactifs (voir figure 9).

L'essai ne s'applique pas aux granulats affectés de réactivité alcali-carbonate, puisqu'ils ne libèrent pas de silice en solution. Dans les autres cas, il n'est pas plus recommandé car il laisse filer de nombreux granulats réactifs (ex. grès de Potsdam: élimination du ciment siliceux réactif lors de la préparation du matériau; tuf rhyolitique de Beauce, schiste à chlorite et graviers lithiques de l'Estrie, tous les calcaires siliceux: interférence entre la silice dissoute et les carbonates et précipitation de gels siliceux) (Fournier & Bérubé 1990, Bérubé & Fournier 1990, 1992).

La littérature renferme d'innombrables cas où cet essai a failli à la tâche tout en présentant souvent de faibles corrélations avec les résultats d'essais d'expansion sur béton et mortier ou la performance en service des granulats à l'étude (Dolar-Mantuani 1969, Grattan-Bellew 1981b, Hobbs 1988, Fournier & Bérubé 1990, Bérubé & Fournier 1990, 1992). Les principales raisons qui peuvent expliquer ces écarts sont les suivantes: (1) l'abaque suggéré dans la norme n'est pas universellement applicable à tous les types de granulats; (2) le concassage que doit subir le granulat favoriserait la libération de silice (notamment des graviers lithiques), ce qui ferait passer pour réactifs certains granulats inoffensifs, ou bien au contraire éliminerait le ciment siliceux réactif de certains granulats (notamment des grès à ciment siliceux du groupe de Potsdam), les classant alors inoffensifs; (3) la température élevée de l'essai peut générer des réactions qui pourraient ne pas avoir lieu en temps normal; (4) il peut y avoir interférence de la part de certaines phases minérales, notamment les carbonates de calcium, de magnésium et de fer (Mielenz et al. 1947, Bérard & Roux 1986, Fournier & Bérubé 1990) ou d'autres minéraux, tel le talc, le gypse, la pyrite, etc.

2.4.5 Méthode chimique modifiée (ASTM C289 sur résidus insolubles)

Au Québec, les calcaires et les dolomies sont largement utilisés comme granulats à béton. L'essai chimique ASTM C289 a été modifié à leur intention dans le but de prévenir la précipitation de silice dissoute par réaction avec les carbonates: l'essai est en fait réalisé sur les résidus insolubles (Bérard & Roux 1986, Fournier & Bérubé 1990). Après avoir réduit le granulat sous forme de particules de 150 à 300 μm , comme pour l'essai normalisé, celles-ci sont immergées dans une solution concentrée de HCl (12N) jusqu'à dissolution complète des carbonates. Le résidu est alors lavé sur un tamis n° 100 (150 μm) et la fraction retenue, de 150-300 μm , est séchée et soumise à l'essai ASTM C289, sous réserve que chaque prise d'essai est normalement de 12,5 g au lieu de 25 g, une telle masse ne pouvant loger dans les contenants utilisés pour l'essai, en raison de la très grande porosité des résidus insolubles. Les résultats sont simplement multipliés par deux pour tenir compte de cette modification.

Les conditions expérimentales de cet essai ont été étudiées de façon détaillée par Fournier & Bérubé (1990), notamment l'influence de l'attaque acide préliminaire et de la fraction granulométrique retenue pour l'essai ASTM C289. On en conclut qu'il est effectivement préférable d'utiliser de l'acide concentrée plutôt que diluée, mais aussi de pratiquer l'essai modifié sur l'ensemble des résidus insolubles obtenus (0-300 μm) plutôt que sur la fraction 150-300 μm de ce résidu, pour des raisons de représentativité. Après attaque acide, le résidu est donc filtré plutôt que lavé sur un tamis de 150 μm . Ainsi modifié, l'essai a été appliqué à 71 échantillons représentatifs des calcaires et dolomies exploités dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Lorsque les résultats obtenus, multipliés ou non par deux, sont reportés sur l'abaque de la norme ASTM C289, sans autre considération, la presque totalité des calcaires expansifs dans le béton se classent réactifs ou potentiellement réactifs, mais aussi les deux tiers environ des bons granulats carbonatés (Fournier & Bérubé 1990, Bérubé & Fournier 1990, 1992). Pour ce type de granulats, l'essai chimique modifié pourrait donc être utilisé comme norme d'acceptation, mais pas de refus.

Quelques modifications viennent toutefois améliorer la situation (Fournier & Bérubé 1990, Bérubé & Fournier 1990, 1992). D'abord, seule la silice dissoute (Sc) est mesurée. Après avoir testé 71 échantillons représentatifs des calcaires et dolomies du Québec, on en a conclu que sont acceptables les granulats qui satisfont à au moins un des critères suivants:

- Sc (silice dissoute) < 100 mmoles/litre;
- Sc^* < 10 mmoles/litre (où $Sc^* = Sc \times \% \text{ résidus insolubles}/100$);
- $\%$ de résidus insolubles < 5% dans la roche.

Cela entraîne le refus de 100% des faciès réactifs et l'acceptation d'environ 60% des bons granulats (réactivité basée sur des essais sur béton ACNOR et sur la performance en service des matériaux). Toutefois, ce dernier chiffre dépend du groupe géologique: il est de 91%, 63%, 44% et 25%, respectivement pour le Trenton, le Black River, le Chazy et le Beekmantown. L'essai demeure donc très sévère pour les deux derniers groupes géologiques, dont seulement deux échantillons testés jusqu'ici à l'Université Laval (Bérubé et al. 1992c) et à Polytechnique (Blanchette 1989) se sont avérés expansifs sur béton, et ce de façon très marginale (expansions dépassant à peine 0,04% à 1 an à l'essai ACNOR).

À cause de l'interférence des carbonates, l'essai chimique normalisé ASTM C289 n'est donc pas utile pour tous les granulats carbonatés (calcaires et dolomies), mais aussi pour tous les granulats silicatés, fort nombreux, qui contiennent des carbonates en plus ou moins grande quantités. Il est donc toujours préférable d'extraire les carbonates par dissolution acide avant de procéder à l'essai ASTM C289, ce qui a l'avantage de corriger la situation dans certains cas (détection de certains granulats réactifs, comme des tufs rhyolitiques de Beauce, des schistes à chlorite de l'Estrie...; Bérubé & Fournier 1990, 1992). Toutefois, certains grès siliceux du Groupe de Potsdam, pourtant réactifs sur béton, nous échappent encore, ce que l'on attribue au concassage qui élimine la plus grande part du ciment siliceux réactif de la roche (Bérubé & Fournier 1990, 1992). D'autre part, un gravier de l'Estrie que nous avons testé jusqu'ici, qui apparaissait inerte à l'essai chimique normalisé, s'est classé réactif à l'essai modifié, tout comme cinq autres graviers de la même région; l'élimination des carbonates pourrait expliquer les écarts entre les deux méthodes, mais on peut se demander si ces graviers sont véritablement réactifs considérant que les sables de même provenance et de même composition, testés en même temps, s'en sont tirés fort bien à l'essai modifié (Bérubé et al. 1987, Bérubé & Fournier 1990). Nous avons alors soulevé l'hypothèse que le concassage subi par les graviers, mais non par les sables, avait pu jouer contre ces gros granulats (bris de la structure cristalline de grains de quartz le long des nouvelles surfaces créées par concassage et exposées par la suite à la solution alcaline lors de l'essai). La présente étude apportera plus d'information à cet égard.

2.4.6 Essai de production de gel («gel pat test»)

Il s'agit d'un essai qualitatif permettant d'évaluer visuellement le potentiel de réactivité alcaline des granulats. Proposé par Jones et Tarleton (1958), cet essai est effectué sur des plaques polies de béton (ou de granulats montés dans une pâte de ciment) que l'on immerge dans une solution de NaOH 1N à une température de 23°C ou plus. Périodiquement, la surface des plaques est examinée afin d'observer l'apparition de gel et la quantité présente à la surface des

granulats. Une température plus élevée (38°C ou 80°C) permet d'accélérer le phénomène. Le gel présent à la surface des plaques n'est pas éliminé après un lavage à l'eau et le granulat est considéré non réactif si aucun gel n'est visible après 28 jours d'immersion à 23°C. Bien que rapide et intéressant, cet essai demeure purement qualitatif. Il est cependant particulièrement utile pour détecter les faciès pétrographiques réactifs au sein de granulats polygéniques, notamment les graviers lithiques. Mentionnons que Fournier & Bérubé (1993) ont récemment tenté de rendre plus quantitatif l'essai de production de gel dans le cas des granulats calcaires et dolomitiques de carrières.

2.4.7 Essai du prisme ou du cylindre de roche ASTM C586

On mesure l'allongement de petits cylindres ou prismes du granulat (35 mm de longueur x 9 mm de diamètre ou d'arête) immergés dans une solution de NaOH 1N à 23°C. On peut résumer ainsi la performance peu satisfaisante de cet essai:

- Recommandé uniquement pour les calcaires dolomitiques argileux susceptibles de réactivité alcali-carbonate, pour lesquels il a été mis au point.
- Non adapté aux granulats siliceux et silicatés: les faciès réactifs peuvent: (1) prendre de l'expansion; (2) ne pas varier; (3) se contracter en apparence (ramollissement des extrémités des cylindres et enfoncement des pointes de mesure du comparateur), ou même (4) se désagréger (dissolution du ciment réactif de certaines roches, tel les grès de Potsdam à ciment siliceux). Le résultat dépend surtout de la présence ou non au sein du granulat d'une source de calcium (ex. calcite) capable de faire précipiter la silice dissoute sous forme de gels expansifs, sinon cette silice demeurera en solution sans pouvoir causer d'expansion.
- Performance fort variable dans le cas des calcaires siliceux: les faciès réactifs montrent plus ou moins d'expansion (nulle à élevée) et de gels siliceux (absents à abondants), alors que des minéraux argileux gonflants peuvent par ailleurs provoquer l'expansion de certains faciès non réactifs.
- L'évaluation représentative d'une source exige un très grand nombre d'essais.
- Sauf dans le cas des granulats susceptibles de réactivité alcalis-carbonate, l'essai dure normalement un an et ne fait donc pas le poids par rapport à l'essai du prisme de béton ACNOR.

2.4.8 Essai de la barre de mortier ASTM C227

Des barres de mortier de 25 x 25 x 275 mm sont fabriquées avec un ciment contenant $0,9 \pm 0,2\%$ d'alcalis (Na_2O éq.) et le granulat réduit à la taille d'un sable dans des proportions granulométriques bien spécifiées. Les proportions granulat:ciment sont de 2,25:1. L'eau est ajoutée au mélange de manière à obtenir un étalement de 105 à 120, sans égard au rapport eau/ciment. Après une cure humide de 24 heures, les barres sont conservées à 38°C et 100% d'humidité dans des contenants hermétiques contenant un peu d'eau, et leur longueur est mesurée périodiquement. La limite d'expansion spécifiée est de 0,1% à 6 mois (ou de 0,05% à 3 mois). L'essai est souvent incapable de détecter de nombreux granulats à expansion tardive. Afin de remédier à cela, plusieurs organismes ont adopté une limite plus sévère de 0,1% à un an (ou de 0,05% à six mois).

Le résultat de l'essai est très fortement influencé par le type de contenant utilisé, mais surtout par la présence d'un matériau absorbant (papier buvard, ratine de coton...) sur ses parois internes (Rogers & Hooton 1989). Ce matériau favorise la condensation et le ruissellement de gouttelettes d'eau à la surface des barres, entraînant dans leur course des alcalis. Après un certain temps, les expansions s'estompent, faute d'alcalis en quantités suffisantes dans les barres. Ces conditions font que la plupart des granulats réactifs québécois satisfont à la norme. Des expansions satisfaisantes sont toutefois obtenues si les barres sont gardées dans un simple récipient hermétique en plastique dont les parois internes ne sont pas recouvertes d'un matériau absorbant.

Le résultat de l'essai dépend aussi du rapport eau/ciment, non spécifié dans la norme, l'eau étant ajoutée au mélange afin d'obtenir l'étalement exigé, de même que de la teneur en alcalis du ciment, variable entre 0,7 et 1,1% (Bérubé & Fournier 1990, 1992). Une pratique recommandée, qui a cours dans plusieurs laboratoires, consiste à ajouter du NaOH à l'eau de gâchage afin d'obtenir une teneur en alcalis de 1,25% (Na_2O éq.) par rapport au ciment. Tout cela suggère que les conditions de conservation (contenant sans matériau absorbant sur ses parois), la teneur en alcalis et le rapport e/c devraient être mieux contrôlés. Toutefois, l'essai demeure assez long et ne fait pas le poids par rapport à un essai sur béton, plus réaliste.

2.4.9 Essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-Proposal-P214 (dit «sud-africain»)

Van Aardt et Visser ont initialement proposé cet essai en 1982 et il fut repris et popularisé par Oberholster & Davies (1986). Il est maintenant largement pratiqué partout à travers le monde. Dans la version ASTM C9-P214, trois barres de mortier sont fabriquées conformément à la

norme ASTM C227, immergées en solution de NaOH 1N à 80°C et mesurées tous les deux à trois jours pendant deux semaines. Plusieurs études ont toutefois démontré qu'un plus faible rapport eau/ciment génère de plus faibles expansions (Davies & Oberholster 1987, Ouellet 1988, Fournier & Bérubé 1991b), ce qui explique que le rapport eau/ciment est contrôlé dans la version ASTM plutôt que l'étalement (0,50 pour les granulats concassés, 0,44 pour les sables naturels). L'interprétation de l'essai est effectuée comme suit:

- Exp. (à 14 jours) < 0,1%: granulats non réactifs.
- Exp. de 0,1 à 0,20%: granulats à expansion lente (0,25% selon Davies & Oberholster 1987).
- Exp. > 0,20%: granulats à expansion rapide (0,25% selon Davies & Oberholster 1987).

Certains auteurs suggèrent des limites d'acceptation (à 14 jours) variables en fonction du type de granulats. Pour sa part, Grattan-Bellew (1990) propose 0,10% pour les granulats calcaires, 0,20% pour les grauwackes, et 0,15% pour les autres types de granulats. Pour leur part, Bérubé et al. (1992a) suggèrent 0,10% pour les granulats calcaires et dolomitiques, 0,15% pour les granulats silicatés de carrières, et 0,20% pour les sables et graviers naturels, cette dernière proposition émanant de la présente étude (nous reviendrons cependant ci-après à une limite de 0,15%).

Au Québec, l'essai a été fort pratiqué et fournit des résultats très intéressants (Bérubé & Fournier 1990, 1992, Bérubé et al. 1992a, Blanchette 1989). Tous les granulats réactifs reconnus dans notre province présentent des expansions <0,1%, à l'exception de certains grès à ciment siliceux du groupe de Potsdam. Dans tous les autres cas, l'essai peut être utilisé comme critère d'acceptation. Par contre, il ne doit toutefois pas servir de critère de refus, car il est trop sévère pour de nombreux granulats qui se comportent pourtant bien en service. Ainsi, environ 45% des bons granulats silicatés de carrières testés à l'Université Laval ont excédé la limite d'acceptation de 0,1%, et encore plus dans le cas des granulats naturels, comme nous le verrons dans cette étude. Le résultat est toutefois meilleur dans le cas des granulats calcaires et dolomitiques, environ 20% seulement des faciès non réactifs testés affichant une expansion >0,1% (Fournier & Bérubé 1991c). Il s'agit donc d'un puissant essai d'acceptation, mais pas de refus.

2.4.10 Essai de la barre de mortier à l'autoclave (méthode Laval/MTQ)

Cet essai, inspiré des essais à l'autoclave proposés par Tang et al. (1987), Nishibayashi et al. (1987) et Tamura et al. (1984), a été mis au point et expérimenté par des chercheurs de l'Université Laval en collaboration avec le MTQ (Fournier et al. 1991, Bérubé et al. 1992b).

Deux barres de mortier sont fabriquées selon la norme ASTM C227, mais avec un rapport eau/ciment fixe de 0,5 (0,44 pour les sables naturels non concassés) et en ajoutant du NaOH à l'eau de gâchage afin d'obtenir une teneur de 3,5% par rapport au ciment. Après une cure humide de 48 heures à 23°C, les barres sont soumises pendant 5 heures à l'autoclave sous une pression de 0,17 MPa (130°C), puis immédiatement mesurées après refroidissement. Une limite d'expansion de 0,15% entraîne le refus de tous les granulats réactifs testés, sauf certains grès de Potsdam, et l'acceptation de 80% des bons granulats (silicatés ou carbonatés). Des expériences récentes suggèrent une limite légèrement inférieure de 0,10% dans le cas des granulats silicatés de carrières (Bérubé et al. 1992b). L'essai peut donc servir de critère d'acceptation, mais pas de refus. Tout en étant plus rapide (trois jours), cet essai s'avère aussi efficace, sinon plus (c'est-à-dire moins sévère), que l'essai accéléré précédent, lequel permettait l'acceptation de 80% des bons granulats carbonatés mais de seulement 55% des bons granulats silicatés (Bérubé et al. 1992a). La principale critique qu'on peut lui faire est la pression et la température élevées auxquelles sont soumis les échantillons. Ces conditions s'éloignent passablement de la réalité et pourraient entraîner des expansions qui ne sont pas le fait de la réactivité alcaline (Van Aardt & Visser 1977). Mentionnons toutefois que les produits de réaction retrouvés dans les barres après les essais sont tout à fait identiques à ceux que l'on retrouve dans les échantillons de béton ou de mortier testés à 38°C ou 80°C ou prélevés dans des ouvrages en service atteints de réactivité alcalis-granulats (Fournier et al. 1991, Dupont 1990).

2.4.11 Essai du prisme de béton ACNOR CAN3-A23.2-14A

Des prismes de béton de dimensions pouvant varier de 75 x 75 x 300 mm à 120 x 120 x 450 mm sont fabriqués avec les granulats à tester, de calibre 5-20 mm, un sable non réactif, et un ciment de type 10 contenant $1,0 \pm 0,2\%$ d'alcalis (Na_2O éq.). De plus, la teneur en alcalis du ciment est rehaussée à 1,25% (Na_2O éq.) par un ajout de NaOH à l'eau de gâchage. Le dosage en ciment est de 310 kg/m^3 et l'eau est ajoutée au mélange de manière à obtenir un affaissement au cône de 80 ± 10 mm, sans égard au rapport eau/ciment. Les prismes sont conservés à 23°C ou 38°C sous des conditions d'humidité relative de 100%, dans une chambre humide ou, plus souvent, dans un récipient hermétique contenant un peu d'eau et muni d'un matériau absorbant qui recouvre ses parois internes. L'expansion à un an ne doit pas excéder 0,025% (23°C) ou 0,04% (38°C). L'essai s'applique à tous les granulats et une température de 38°C est en fait recommandée dans tous les cas.

Tout comme pour l'essai sur mortier ASTM C227, le résultat de l'essai sur béton ACNOR dépend du rapport eau/ciment, ce qui n'étonne toutefois pas. En effet, un plus faible rapport e/c, par exemple, entraîne: (1) une concentration plus élevée en alcalis dans la solution interstitielle (moins abondante) et donc un milieu chimique plus agressif; (2) une porosité plus faible, laissant ainsi moins d'espace disponible pour les gels expansifs; (3) une plus faible perméabilité, ce qui réduit la mobilité des espèces ioniques agressives en solution et ainsi la vitesse des réactions, et (4) un béton de résistance mécanique plus élevée, donc plus résistant aux efforts d'expansion. Les deux premiers facteurs sont aggravants, contrairement aux deux autres. Le résultat global peut théoriquement varier dans un sens comme dans l'autre. D'ailleurs, des résultats obtenus avec un matériau très réactif (grès opalin) suggèrent qu'un plus faible rapport e/c réduit les expansions (Krell 1987), alors que d'autres travaux avec des granulats réactifs plus habituels montrent le contraire (Bérubé & Fournier 1990, 1992, Grattan-Bellew, CNRC, comm. pers.). Malheureusement, le rapport eau/ciment n'est pas contrôlé dans la norme, l'eau étant ajoutée au mélange de manière à rencontrer l'affaissement prescrit (80 ± 10 mm). Or il variera naturellement avec la forme des particules qui, à son tour, dépend de la nature des granulats testés (plans de stratification, schistosité...) et de la méthode de préparation de ces granulats (type de concasseur...).

Il semble également que les prismes de béton subissent un certain lessivage de leurs alcalis en cours d'essai, ce qui aurait pour effet de réduire les expansions à long terme (Rogers & Hooton 1989). Le phénomène ne serait toutefois pas aussi critique que pour l'essai sur mortier ASTM C227. En effet, la présence d'un matériau absorbant permet cette fois d'obtenir malgré tout des expansions plus élevées (Fournier & Bérubé 1991d), ce qui laisse croire qu'une plus grande humidité est somme toute bénéfique dans le cas de prismes de béton.

Cependant, les présentes conditions de l'essai ne semblent pas assez sévères pour détecter de nombreux granulats réactifs à expansion tardive, tels des grauwackes, des argillites, des phyllades et des graviers lithiques (Rogers 1990). Un dosage en ciment plus élevé de quelque 420 kg/m^3 (au lieu de 310) permettrait toutefois de corriger cette situation, et il faut prévoir que la norme ACNOR sera bientôt modifiée en ce sens. Malgré ses quelques défauts, dont les plus importants demeurent sa durée et sa reproductibilité relativement faible, l'essai sur béton demeure le plus réaliste des essais de RAG. Au Québec, par exemple, il permet d'évaluer correctement la plupart des granulats, à quelques exceptions près (apparemment certains graviers lithiques). C'est ce que nous verrons dans cette étude.

2.4.12 Essai modifié du prisme de béton ACNOR

Afin de pallier les lacunes inhérentes à la norme ACNOR actuelle (influence du rapport e/c, lessivage des alcalis, non-détection de granulats réactifs à expansion tardive, faible reproductibilité), un groupe de travail a récemment proposé les modifications suivantes (CSA 1992):

- Augmentation du dosage en ciment de 310 à 420 kg/m³ en augmentant toujours la teneur en alcalis du ciment à 1,25% Na₂O éq. par une addition de NaOH à l'eau de gâchage. De cette manière, la quantité d'alcalis dans le béton passerait de 3,88 à 5,25 kg/m³.
- Rapport eau/ciment contrôlé entre 0,42 et 0,45 et rapport gros granulat/granulat fin fixé à 60/40. Ce dernier rapport peut varier présentement entre 65/35 et 50/50.
- Spécimens emballés dans un matériau absorbant (normalisé), insérés avec une certaine quantité d'eau dans un sac de plastique, lequel est ensuite scellé, le tout étant placé dans un seau en plastique hermétique (normalisé) contenant un peu d'eau au fond et dont les parois sont recouvertes de ratine de coton, avant d'être remis à 38°C dans une chambre à température contrôlée.

Ces modifications devraient effectivement permettre de détecter de nombreux granulats réactifs à expansion tardive, notamment les graviers naturels de la région de Sudbury (Rogers 1990) et d'obtenir des valeurs d'expansions plus reproductibles. Sur la base des résultats obtenus dans le cadre des travaux de doctorat de M. Benoît Fournier (1992), on peut d'ores et déjà s'attendre à ce que de nombreux granulats calcaires et dolomitiques du Québec, qui ont passé avec succès l'essai sur béton ACNOR, dans sa forme actuelle, tout en étant considérés comme non problématiques en service, soient dorénavant considérés comme «réactifs» après de telles modifications à la norme ACNOR.

2.4.13 Essai accéléré du prisme de béton (méthode «sud-africaine»)

Au Québec, des prismes de béton sont fabriqués selon la norme ACNOR CAN3-A23.2-14A, immergés dans une solution alcaline de NaOH 1N, placés dans une étuve maintenue à 80°C et mesurés pendant au moins 30 jours (Ouellet 1988, Blanchette 1989, Bérubé & Fournier 1990, 1992). L'essai présente l'avantage d'être rapide et de prime abord plus réaliste que son équivalent sur mortier, puisqu'il est effectué sur du béton. Sous réserve d'une limite d'acceptation de 0,04% à 24 jours, tous les granulats réactifs québécois sont rejetés, mais

nombre de bons granulats le sont également (40% environ dans le cas des calcaires et dolomies) (Bérubé & Fournier 1992). Il ne saurait donc servir que de norme d'acceptation, mais pas de refus. En particulier, nous verrons qu'il est très sévère pour les graviers naturels de composition granitique. Bref, les résultats obtenus jusqu'ici sont dans l'ensemble bien inférieurs à ceux obtenus pour l'essai équivalent sur mortier. L'essai accéléré sur béton demeure toutefois le seul essai accéléré qui puisse être pratiqué sur du béton en service, c'est-à-dire sur des carottes de béton (Bérubé & Fournier 1991).

ÉCHANTILLONNAGE, PRÉPARATION DES MATÉRIAUX ET PROGRAMME D'ESSAIS

3.1 SÉLECTION DES SOURCES

De concert avec le ministère des Transports, dix-neuf sources exploitant au Québec des granulats naturels ont été sélectionnées, et ce à partir des critères suivants:

- Sources à la fois de granulats grossiers et de granulats fins pour le béton de ciment.
- Volumes importants de production et exploitation prévue pour plusieurs années encore.
- Sources d'approvisionnement pour le MTQ.
- Sources géologiquement et géographiquement représentatives des gravières du Québec.

À des fins de comparaison, un gravier réactif bien connu de la région de Sudbury, en Ontario, a été ajouté à l'étude (Magni et al. 1987). La localisation géographique des sources, marquées de A à T, est schématisée à la figure 1. On en retrouve 6 (A à F) sur la rive nord du Saint-Laurent (province géologique du Grenville), 6 (G à L) en Gaspésie (province géologique des Appalaches), 4 (M à P) en Estrie (Appalaches) et 3 (Q à S) en Abitibi (province géologique du Supérieur). Le granulats réactif de référence (T) appartient lui-aussi au Supérieur.

3.2 GÉOLOGIE ET ÉCHANTILLONNAGE

L'échantillonnage a été effectué au cours de l'été 1989. Sur le site de chacune des sources choisies, à l'exception du gravier de Sudbury qui nous fut transmis par le ministère des Transports de l'Ontario, des échantillons de gravier et de sable furent prélevés à même les piles de réserve, selon une procédure visant à s'assurer de leur représentativité. Au total, nous avons donc recueilli 20 échantillons de graviers (incluant le gravier ontarien) et 19 échantillons de sables.

Les travaux effectués sur le terrain, outre l'échantillonnage, ont consisté en une brève description du site et de la géologie des dépôts. Ces informations sont résumées à l'annexe A. Les points suivants furent alors considérés:

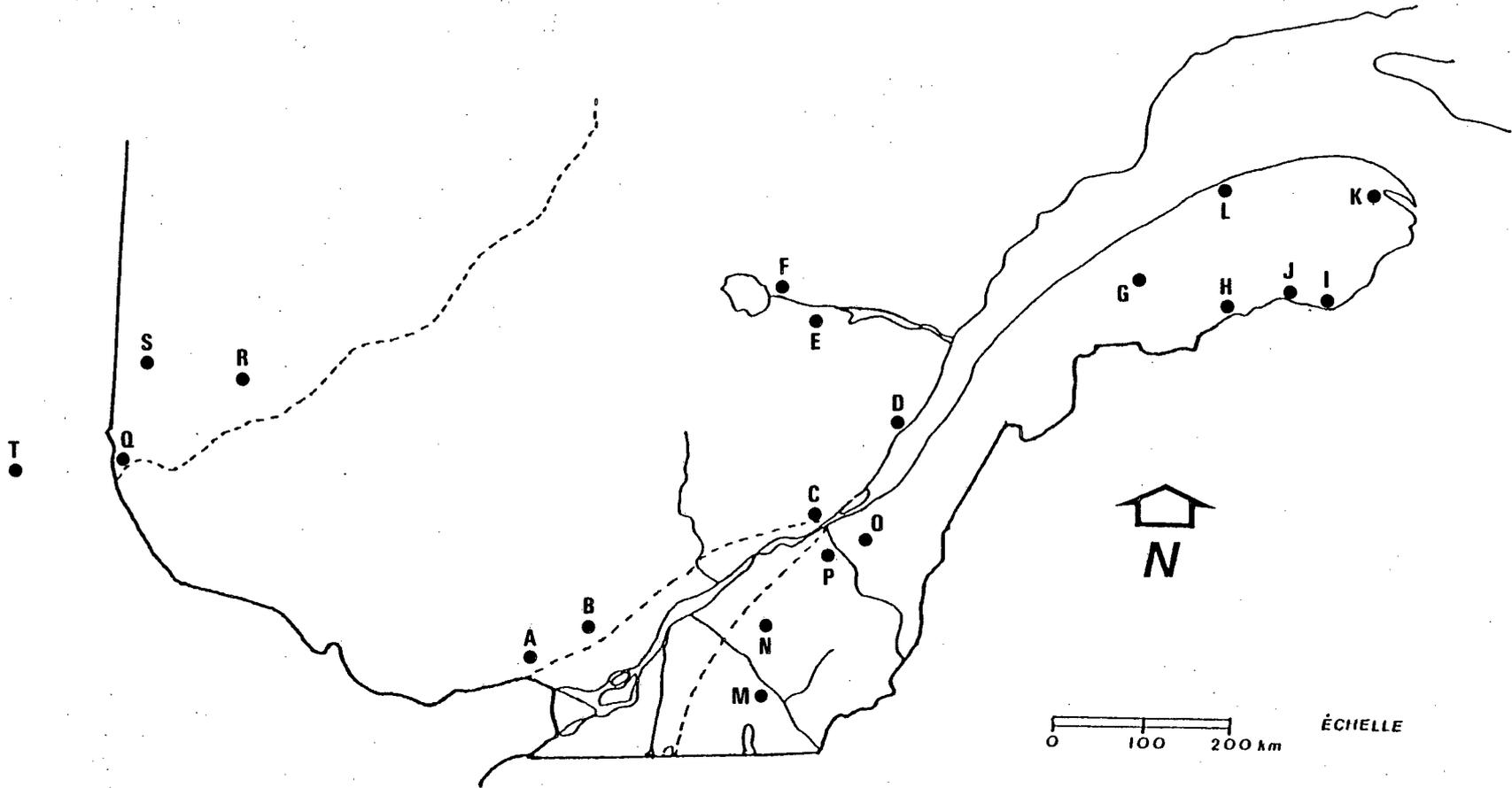


Figure 1. Localisation des sources échantillonnées.

- la topographie et la disposition du site;
- l'origine du dépôt;
- la stratigraphie de la face en exploitation;
- la granulométrie globale du dépôt;
- les faciès pétrographiques dominants;
- le traitement des matériaux sur le site.

Dans le cas de quatre exploitations (A, F, N et Q), les échantillons de gravier et de sable provenaient de deux dépôts suffisamment éloignés l'un de l'autre pour être différents au point de vue de la composition.

3.3 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Les matériaux échantillonnés furent soumis à toute une série d'opérations de tamisage, de concassage, de broyage et de séparation afin d'obtenir le matériel requis pour les différents essais à réaliser. Ces travaux, effectués en partie à l'usine-pilote du MERQ, au Laboratoire Central du MTQ et à l'Université Laval, sont schématisés aux figures 2 (graviers) et 3 (sables). Ces opérations furent menées de façon très méthodique afin d'obtenir des sous-échantillons qui soient le plus représentatifs possible des lots de départ.

3.4 PROGRAMME D'ESSAIS

Les essais, effectués en partie à l'Université Laval et au Laboratoire Central du MTQ, peuvent être regroupés en trois catégories selon qu'ils visaient à déterminer respectivement: (1) la composition des matériaux, (2) leur performance physico-mécanique, et (3) leur potentiel de réactivité alcaline dans le béton.

3.4.1 Composition des matériaux

La composition chimique, minéralogique et pétrographique des matériaux a été évaluée à l'aide des analyses et essais suivants:

- Analyse chimique classique des oxydes majeurs (sables/graviers).
- Mesure du pourcentage de résidu insoluble par lixiviation acide (sables/graviers).
- Examen mégascopique et composition pétrographique (sables/graviers).
- Examen microscopique en lames minces des divers faciès pétrographiques (graviers).

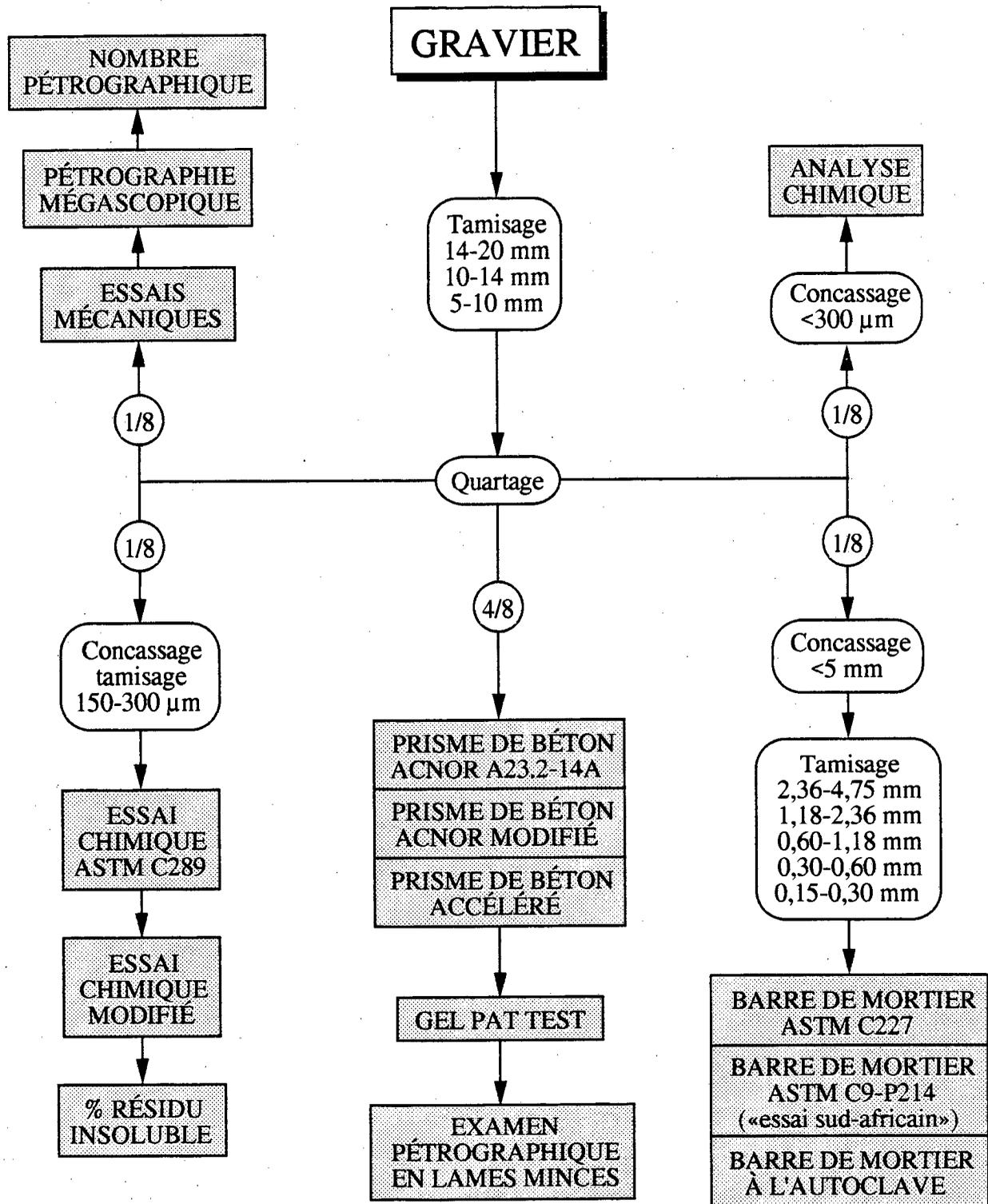


Figure 2. Préparation des échantillons de gravier et programme d'essais et d'analyses.

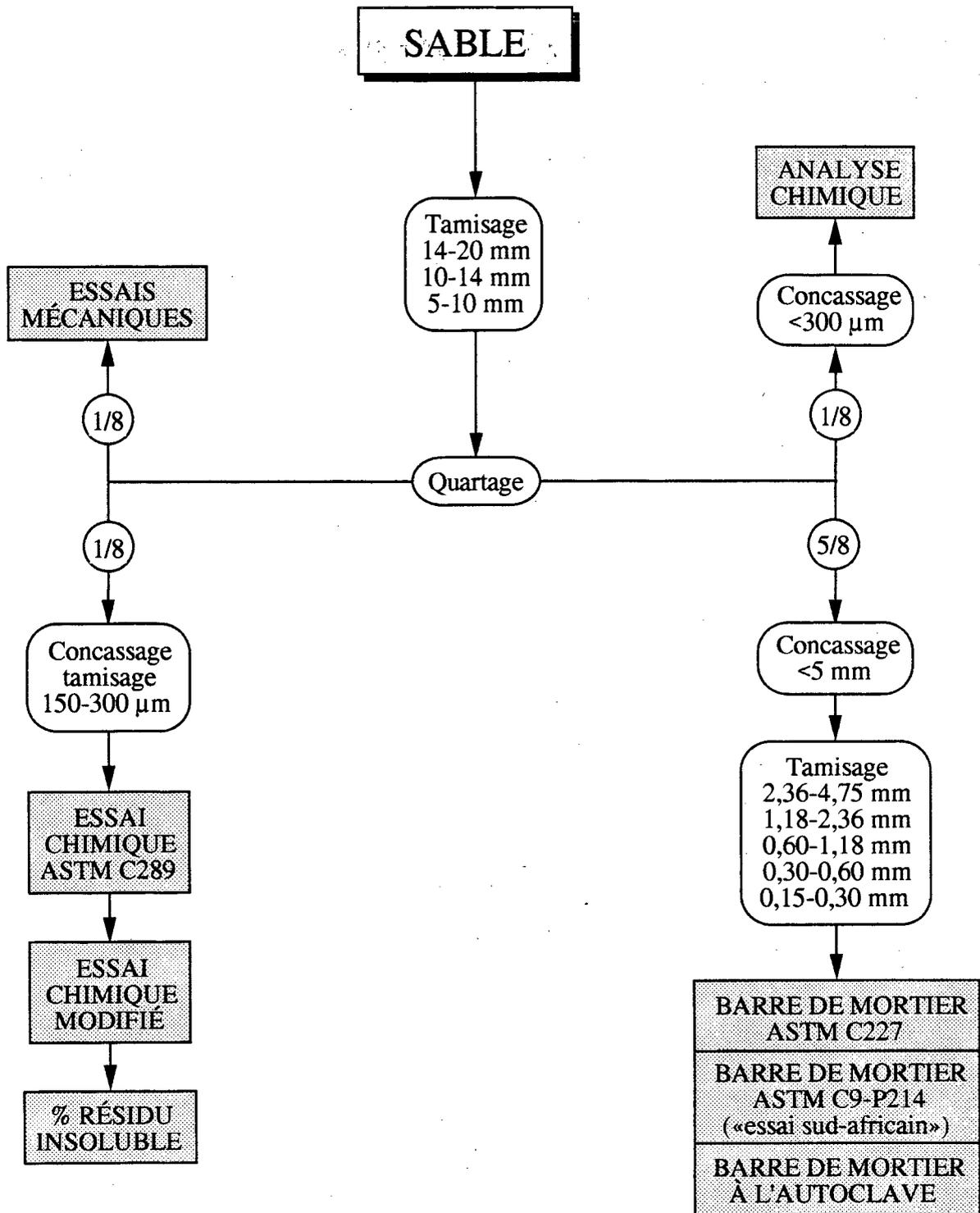


Figure 3. Préparation des échantillons de sable et programme d'essais et d'analyses.

3.4.2 Évaluation du potentiel de réactivité alcaline dans le béton

Au point de vue de la réactivité alcaline dans le béton, les essais suivants ont été réalisés:

- Méthode chimique ASTM C289 (sables/graviers).
- Méthode chimique modifiée (ASTM C289 sur résidus insolubles) (sables/graviers).
- Essai de la barre de mortier ASTM C227 (sables/graviers).
- Essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 (dit «sud-africain») (sables/graviers).
- Essai de la barre de mortier à l'autoclave (méthode Laval/MTQ) (sables/graviers).
- Essai de production de gel («gel pat test») (graviers).
- Essai du prisme de béton ACNOR A23.2-14A (310 kg/m³ de ciment) (graviers).
- Essai modifié du prisme de béton (essai ACNOR avec 410 kg/m³ de ciment) (graviers).
- Essai accéléré du prisme de béton (méthode «sud-africaine») (graviers).

3.4.3 Caractéristiques physiques et performance mécanique

Les essais suivants ont été effectués par le personnel du Laboratoire Central du MTQ:

- Analyse granulométrique BNQ-2560-040 et module de finesse (sables).
- Nombre Pétrographique BNQ-2560-900 (graviers).
- Densité et absorption BNQ-2560-065/067 (sables/graviers).
- Durabilité aux sulfates BNQ-2560-450 (sables).
- Particules plates et allongées BNQ-2560-265 (graviers).
- Micro Deval Humide BNQ-2560-070 (graviers).
- Degré de fragmentation (graviers).
- Matières organiques (essai à la soude) BNQ-2560-280 (sables).

Certains essais physico-mécaniques courants, par exemple l'essai Los-Angeles, n'ont pu être effectués parce que nous avons manqué de matériel. Précisons que les essais physico-mécaniques n'ont été effectués qu'afin de compléter la fiche technique des granulats à l'étude. Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux 5 à 7 mais ne seront pas discutés ci-après, à l'exception du Nombre Pétrographique. Quant aux valeurs de densité brute et d'absorption, elles ont bien sûr servi aux calculs de tous les mélanges de mortier et de béton réalisés dans le cadre de cette étude.

TABLEAU 5
 Résultats de l'analyse granulométrique des sables.

Source	% cumulé passant le tamis de:						
	5 mm	2,5 mm	1,25 mm	630 μ m	315 μ m	160 μ m	80 μ m
A	100	93	79	55	34	4	4,2
B	100	97	75	51	31	6	6,3
C	100	97	88	63	28	8	0,2
D	100	97	88	61	26	8	3,1
E	100	99	95	76	41	14	4,1
F	100	89	73	54	27	9	1,9
G	100	90	69	48	29	11	2,8
H	100	54	20	9	4	1	1,1
I	100	89	69	50	31	5	5,2
J	100	89	70	46	25	12	5,2
K	100	96	93	86	51	18	8,5
L	100	81	64	51	34	3	2,0
M	100	87	76	63	41	6	5,6
N	100	90	78	61	29	9	2,1
O	100	90	78	60	28	4	1,1
P	100	75	50	27	10	4	1,3
Q	100	89	63	31	11	2	1,7
R	100	89	75	59	40	3	2,7
S	100	87	74	55	28	3	3,1

TABLEAU 6
 Résultats des essais physico-mécaniques sur les graviers.

Source	Essais						
	Nombre pétrogr.	Densité brute	Absorpt. (%)	% part. plates	% part. allongées	Micro Deval (% pertes)	Fragm. (%)
A	102	2,689	0,59	16	17	7,2 B	91
B	102	2,712	0,71	15	29	9,1 C	98
C	103	2,624	0,70	7	18	10,7 B	90
D	122	2,693	0,72	9	23	20,0 B	99
E	102	2,699	0,51	13	27	7,6	94
F	121	2,699	0,61	6	16	10,0 B	95
G	121	2,558	1,87	19	39	17,0 B	63
H	120	2,649	1,02	27	42	17,2 B	70
I	125	2,617	1,18	18	29	20,3 B	74
J	129	2,652	1,04	25	28	15,1 B	62
K	133	2,607	1,16	21	31	20,9 B	74
L	108	2,680	0,71	13	32	6,2	64
M	108	2,656	0,93	13	27	15,3 B	71
N	149	2,627	1,12	20	39	19,1 B	90
O	132	2,610	0,97	29	25	12,2 B	72
P	126	2,572	1,31	22	15	14,9 B	74
Q	102	2,715	0,49	13	21	7,3 B	85
R	106	2,791	0,43	12	32	7,1 C	84
S	100	2,785	0,43	12	18	5,7 B	85

TABLEAU 7
 Résultats des essais physico-mécaniques sur les sables.

Source	Essais				
	Densité brute	Absorpt. (%)	MgSO ₄ (% pertes)	Module de finesse	Essai à la soude
A	2,674	0,46	2,6	2,35	2
B	2,720	0,68	2,6	2,39	2
C	2,649	0,38	4,9	2,16	0
D	-	-	4,0	2,22	0
E	2,658	0,66	5,6	1,75	1
F	2,677	0,54	4,8	2,47	1
G	2,546	2,31	5,8	2,53	0
H	2,607	1,83	3,6	4,12	0
I	2,610	1,48	6,0	2,56	0
J	2,629	1,52	5,6	2,58	0
K	2,564	1,44	12,5	1,56	2
L	2,654	1,38	5,0	2,66	0
M	2,661	0,68	4,3	2,28	0
N	2,648	0,91	9,4	2,33	0
O	2,632	0,97	6,2	2,40	0
P	2,571	1,65	7,6	3,35	5
Q	2,628	1,65	9,3	3,04	0
R	2,704	0,75	2,3	2,34	1
S	2,714	0,99	2,4	2,53	2

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 COMPOSITION CHIMIQUE ET POURCENTAGE DE RÉSIDUS INSOLUBLES

L'analyse chimique des granulats et leur contenu en résidus insolubles sont présentés aux tableaux 8 et 9, et illustrés sur les diagrammes ternaires (SiO_2 , Al_2O_3 , carbonates) des figures 4 et 5. Le pôle «carbonates» sur ces diagrammes est égal à $100 - \% \text{RI}$. Un plus fort pourcentage de carbonates se traduit également dans l'analyse chimique par une perte au feu (CO_2) et un contenu en CaO (calcite ou CaCO_3) plus élevés, et généralement par un contenu inférieur en silice.

Les graviers du Grenville (A à F) contiennent 59 à 72% de SiO_2 , présentent des contenus relativement élevés en Na_2O (3 à 4%) et en Al_2O_3 (13 à 20%), mais faibles en carbonates (pertes au feu <2% et insolubles >92%). Les graviers du Supérieur (Q à T) ont une composition chimique assez semblable. Ceux de la Gaspésie (G à L) sont différents et plus variables en composition. Leur contenu en SiO_2 est nettement plus faible et varie de 38 à 63%. Des quatre groupes de graviers, ce sont les plus faibles en Na_2O (<2%) et en Al_2O_3 (<10%), et les plus riches en carbonates, ce qui se traduit par les plus forts contenus en CaO (10 à 28%), les pertes au feu les plus élevées (7 à 24%) et les plus faibles pourcentages de résidus insolubles (47 à 83%). Dans l'ensemble, les graviers de l'Estrie (M à P) sont plus siliceux (61 à 81%) que ceux de la Gaspésie, leurs pertes au feu sont aussi moins importantes (1 à 9%) et leurs contenus en carbonates sont plus faibles ($\text{RI} > 81\%$). Ils se divisent toutefois en deux groupes: la composition des graviers M et N, plus riches en carbonates, tend vers celle des graviers les plus siliceux de la Gaspésie, alors que les échantillons O et P, plus siliceux, se rapprochent davantage des graviers du Grenville et du Supérieur, tout en étant cependant moins alumineux.

La composition chimique des sables est en général plutôt semblable aux graviers de même provenance, sous réserve des remarques suivantes: (1) dans l'ensemble, les contenus en SiO_2 et en insolubles (= $100 - \text{carbonates}$) sont semblables ou plus élevés pour les sables, ce qui est en bon accord avec des pertes au feu et des contenus en calcium (calcite) généralement plus faibles que pour les graviers correspondants (c'est particulièrement le cas des sources M, N et surtout K, nous y reviendrons); (2) font exceptions à cette règle les sources E, L et Q, dont les

TABLEAU 8
Résultats de l'analyse chimique des graviers.

Source	Oxydes ou composantes (%)													RI*
	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	Cr2O3	MnO	Fe2O3	PAF	SOMME	
A	2,97	1,45	13,08	67,59	0,13	3,90	3,40	0,87	0,01	0,08	5,58	0,87	99,90	94,2
B	3,29	1,34	16,12	61,81	0,31	3,32	4,74	1,08	0,01	0,11	6,70	0,58	99,39	95,4
C	3,42	0,57	13,55	71,83	0,04	4,32	1,55	0,39	0,01	0,06	3,79	0,34	99,87	96,9
D	2,98	1,46	15,04	62,39	0,30	3,25	5,74	0,86	0,01	0,08	6,04	1,76	99,92	91,8
E	3,94	1,85	19,53	59,06	0,11	2,56	6,24	0,51	0,03	0,07	4,36	0,67	98,93	97,2
F	3,23	1,53	16,18	59,37	0,37	3,98	3,92	1,20	0,00	0,12	7,94	1,23	99,08	93,0
G	0,37	2,64	4,28	52,02	0,02	1,02	19,10	0,23	0,01	0,03	1,93	18,11	99,75	59,5
H	1,52	2,07	8,65	44,80	0,06	1,34	18,92	0,56	0,01	0,08	4,42	16,85	99,28	64,4
I	1,42	1,99	7,53	53,80	0,04	1,42	15,60	0,44	0,03	0,08	3,23	13,87	99,46	68,7
J	1,93	2,50	9,93	53,02	0,12	1,57	12,46	0,68	0,02	0,10	5,20	11,47	99,00	75,6
K	0,55	1,38	4,28	37,73	0,03	0,83	28,07	0,22	0,01	0,06	2,02	23,93	99,11	47,0
L	1,78	2,27	8,54	63,12	0,08	1,20	9,92	0,59	0,02	0,10	4,86	7,21	99,68	83,4
M	1,87	2,48	8,02	61,23	0,09	1,29	10,29	0,65	0,02	0,13	4,66	8,94	99,68	81,1
N	1,96	1,40	10,20	63,86	0,09	1,74	7,57	0,66	0,01	0,18	4,91	7,11	99,69	82,9
O	1,62	0,88	7,89	80,56	0,03	1,28	0,70	0,52	0,01	0,08	3,92	1,33	98,83	96,9
P	1,90	1,13	8,26	80,01	0,08	1,25	0,51	0,47	0,02	0,07	4,00	1,37	99,08	96,6
Q	4,13	2,58	14,88	64,85	0,10	1,81	3,13	0,52	0,02	0,08	5,60	1,93	99,64	97,9
R	3,29	4,76	14,84	58,59	0,06	1,27	5,60	0,61	0,05	0,13	7,56	2,13	98,88	97,7
S	3,47	3,81	14,82	59,84	0,09	1,02	5,71	0,74	0,03	0,14	8,28	2,00	99,25	97,4
T	3,01	2,39	12,69	68,92	0,06	2,03	2,01	0,47	0,03	0,08	5,61	1,44	98,75	98,0

* Mesure par dissolution acide des carbonates.

TABLEAU 9
Résultats de l'analyse chimique des sables.

Source	Oxydes ou composants (%)													RI*
	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	Cr2O3	MnO	Fe2O3	PAF	SOMME	
A	2,39	1,09	10,84	75,20	0,06	3,02	2,32	0,47	0,01	0,07	3,98	0,35	99,81	98,1
B	2,88	1,54	14,83	65,88	0,13	2,39	4,43	0,89	0,01	0,08	5,94	0,54	99,54	97,4
C	3,07	0,54	12,36	73,46	0,04	3,61	1,87	0,43	0,01	0,06	3,85	0,19	99,51	97,6
D	2,93	1,26	13,66	65,24	0,18	3,07	3,54	1,55	0,01	0,10	8,02	-0,07	99,50	94,6
E	3,12	1,06	14,18	63,84	0,08	2,50	7,46	0,48	0,02	0,07	3,85	3,85	99,51	91,0
F	3,93	1,22	17,62	64,01	0,03	2,22	5,40	0,51	0,01	0,06	3,84	0,90	99,76	96,2
G	0,47	2,64	4,99	56,66	0,02	1,15	15,82	0,23	0,01	0,03	2,16	15,93	100,11	65,3
H	1,51	2,70	9,25	46,64	0,07	1,56	17,65	0,53	0,03	0,09	4,89	15,77	100,24	62,6
I	1,07	2,12	8,06	56,46	0,06	1,66	12,96	0,48	0,03	0,08	4,02	12,11	99,11	75,4
J	1,74	2,30	10,94	57,08	0,08	1,96	9,71	0,66	0,02	0,09	5,50	9,94	100,01	78,0
K	1,54	0,73	7,40	81,98	0,05	1,76	0,49	0,33	0,02	0,07	3,17	2,00	99,55	96,6
L	1,49	4,85	7,56	44,44	0,04	1,49	18,39	0,27	0,02	0,07	3,47	17,98	100,06	56,9
M	1,86	1,45	9,01	69,88	0,05	1,97	5,34	0,57	0,03	0,09	4,44	4,08	98,76	92,8
N	2,51	0,87	11,63	70,40	0,05	2,72	3,55	0,75	0,02	0,10	4,80	2,08	99,46	94,9
O	1,22	0,98	7,66	82,62	0,02	1,60	0,46	0,47	0,02	0,07	4,41	1,14	100,67	96,7
P	1,51	1,35	8,51	79,24	0,03	1,53	0,48	0,41	0,02	0,08	4,11	1,56	98,84	97,8
Q	1,41	2,99	9,66	63,11	0,06	1,48	7,59	0,49	0,04	0,09	5,80	6,60	99,33	88,6
R	3,85	2,75	13,96	66,10	0,06	1,29	3,77	0,50	0,03	0,10	5,83	1,35	99,58	97,9
S	3,21	2,82	13,59	65,64	0,03	1,13	3,84	0,62	0,03	0,11	6,92	1,63	99,57	96,9

* Mesure par dissolution acide des carbonates.

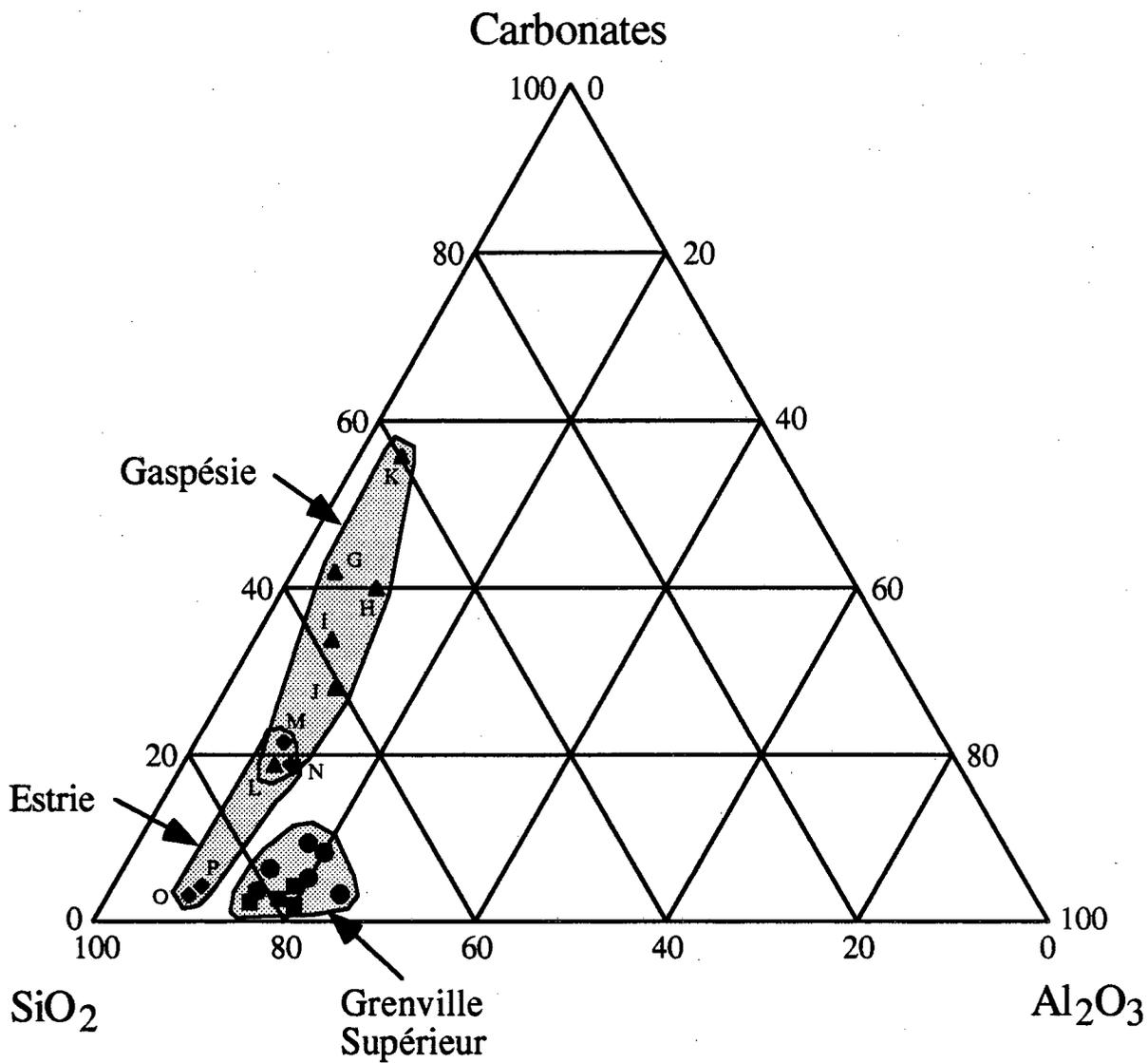


Figure 4. Diagramme ternaire SiO₂ - Al₂O₃ - Carbonates des graviers.

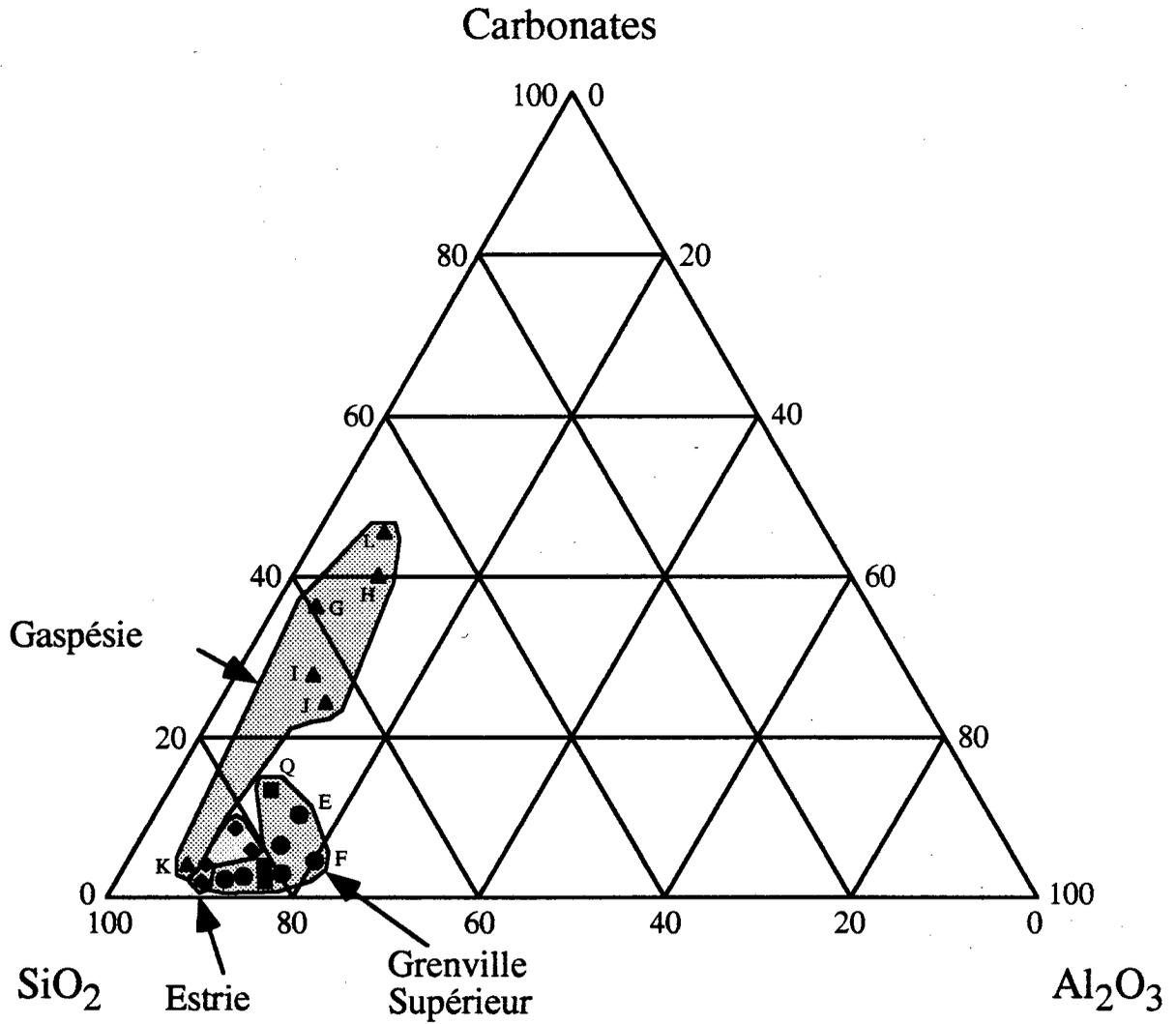


Figure 5. Diagramme ternaire SiO₂ - Al₂O₃ - Carbonates des sables.

sables contiennent nettement plus de carbonates (plus faibles %RI) que les graviers correspondants; (3) les plus grands écarts de composition entre sables et graviers concernent les sources K (gravier très riche en carbonates et sable très siliceux) et L (gravier beaucoup plus siliceux et sable beaucoup plus riche en carbonates), à tel point qu'il était permis de se demander s'il n'y avait pas eu inversion dans les résultats d'analyse des sables K et L, quoique sûrement pas dans le cas des graviers correspondants, dont la composition chimique est compatible avec la composition pétrographique décrite à la section suivante. La reprise de certaines analyses chimiques a toutefois indiqué qu'il n'y avait pas eu inversion dans les résultats d'analyse.

À titre informatif, nous présentons au tableau 10 la composition chimique du ciment utilisé pour les essais d'expansion sur mortier et sur béton. Les valeurs indiquées correspondent à la moyenne des analyses effectuées sur huit échantillons du même lot de ciment.

4.2 EXAMEN MÉGASCOPIQUE ET COMPOSITION PÉTROGRAPHIQUE

La composition pétrographique des échantillons de gravier a été déterminée en même temps que leur Nombre Pétrographique. Chaque particule fut examinée avec les outils usuels (loupe, canif, acide chlorhydrique diluée...) et classée selon sa nature. Le tableau 11 présente, pour chacun des échantillons, les principaux types de roches observées ainsi que leurs pourcentages respectifs. Les résultats sont reportés sur le diagramme ternaire (calcaires, roches quartzieuses, granitoïdes) de la figure 6. Le pôle «roches quartzieuses» sur ce diagramme comprend en fait toutes les roches très riches en quartz d'origine sédimentaire (grès, grauwacke) ou métamorphique (quartzite). Le pôle «granitoïdes» regroupe quant à lui toutes les roches ignées extrusives (granite, granodiorite, diorite) et leurs équivalents métamorphiques (gneiss). Des schistes (métamorphiques, argileux) et argillites, présents en quantités variables dans tous les graviers des Appalaches (G à P) et dans deux échantillons du Supérieur (Q et T), des roches volcaniques observées dans les deux autres graviers du Supérieur (R, S), de même que d'autres faciès non différenciés dans chacun des échantillons ne sont pas représentés sur le diagramme ternaire de la figure 6 (voir tableau 11).

TABLEAU 10

Composition du ciment utilisé pour les essais sur mortier et sur béton.

Oxyde ou composante	%
CaO	63,17
SiO ₂	20,67
Al ₂ O ₃	5,56
Fe ₂ O ₃	2,67
SO ₃	2,79
MgO	2,13
K ₂ O	1,07
Na ₂ O	0,24
TiO ₂	0,28
SrO	0,22
P ₂ O ₅	0,23
Mn ₂ O ₃	0,05
ZnO	0,01
Cr ₂ O ₃	0,01
TOTAL	98,99
Na ₂ O éq.	0,95
Silicate tricalcique C ₃ S	50,92
Silicate bicalcique C ₂ S	20,75
Aluminate tricalcique C ₃ A	10,20
Ferro-aluminate tétracalcique C ₄ AF	8,13
Module de silice	2,51
Module de fer	2,08
Pertes au feu	0,95

TABLEAU 11

Caractéristiques pétrographiques des échantillons de gravier et résultats de l'essai de production de gel.

Source	Faciès pétrographiques	%	N.P.	Phases potentiellement réactives	Cote pétro. ¹	Cote à l'EPG ²
A	gneiss granitique diorite autres	67 18 15	102	quartz roulant	1	1
B	gneiss granitique diorite quartzite autres	52 31 7 10	102	quartz roulant	1	1
C	gneiss granitique diorite granite autres	49 25 20 6	103	quartz roulant	1	1
D	granite diorite gneiss granitique calcaire autres	61 16 13 5 5	122	quartz roulant silice microcristalline dans le calcaire	1	2
E	gneiss granitique diorite granite autres	64 22 10 4	102	quartz roulant	1	1
F	gneiss granitique anorthosite syénite granite autres	32 25 23 12 8	121	quartz roulant	1	1
G	calcaire schiste métamorphique autres	86 12 2	121	quartz microcristallin traces de chert	2-3	3
H	calcaire grès + grauwacke schiste métamorphique autres	50 27 18 5	120	quartz roulant quartz microcristallin	2	3
I	calcaire schiste métamorphique grès + grauwacke	55 30 15	125	quartz roulant quartz microcristallin quartz cryptocristallin	3	3
J	calcaire grès + grauwacke schiste métamorphique autres	36 29 22 13	129	quartz roulant quartz microcristallin quartz cryptocristallin	3	3
K	calcaire grès + grauwacke schiste métamorphique	85 10 5	133	quartz microcristallin quartz cryptocristallin chert ?	3	3

1) Potentiel pétrographique de réactivité: 1: faible à nul; 2: moyen; 3: élevé.

2) Essai de production de gel: 1: non réactif; 2: marginalement réactif; 3: réactif.

TABLEAU 11 (suite)

Caractéristiques pétrographiques des échantillons de gravier et résultats de l'essai de production de gel.

Source	Faciès pétrographiques	%	N.P.	Phases potentiellement réactives	Cote pétro. ¹	Cote à l'EPG ²
L	calcaire quartzite syénite schiste métamorphique gneiss granitique grès + grauwacke autres	16 21 13 13 10 9 18	108	quartz roulant quartz microcristallin quartz cryptocristallin	3	3
M	grès + grauwacke schiste métamorphique calcaire quartzite gneiss granitique autres	33 17 14 14 11 11	108	quartz roulant quartz microcristallin quartz cryptocristallin	3	3
N	grès + grauwacke calcaire gneiss granitique schiste métamorphique schiste argileux mou	54 19 9 8 10	149	quartz roulant quartz microcristallin quartz cryptocristallin	3	3
O	grès + grauwacke quartzite schiste métamorphique schiste argileux	66 16 13 5	132	quartz roulant quartz microcristallin	3	2
P	grès + grauwacke quartzite schiste métamorphique gneiss granitique schiste argileux	48 22 17 10 3	126	quartz roulant quartz microcristallin quartz cryptocristallin	3	3
Q	gneiss granitique diorite grès + grauwacke schiste métamorphique autres	50 20 9 8 13	102	quartz roulant quartz microcristallin quartz cryptocristallin	2-3	2
R	diorite gneiss granitique andésite autres	40 31 10 19	106	quartz roulant quartz microcristallin	2	2
S	diorite gneiss granitique andésite + autres	62 22 16	100	quartz roulant quartz microcristallin	2	2
T	grès + grauwacke quartzite argillite granite + gneiss	60 13 12 15	n.d.	quartz microcristallin quartz cryptocristallin	3	3

1) Potentiel pétrographique de réactivité: 1: faible à nul; 2: moyen; 3: élevé.

2) Essai de production de gel: 1: non réactif; 2: marginalement réactif; 3: réactif.

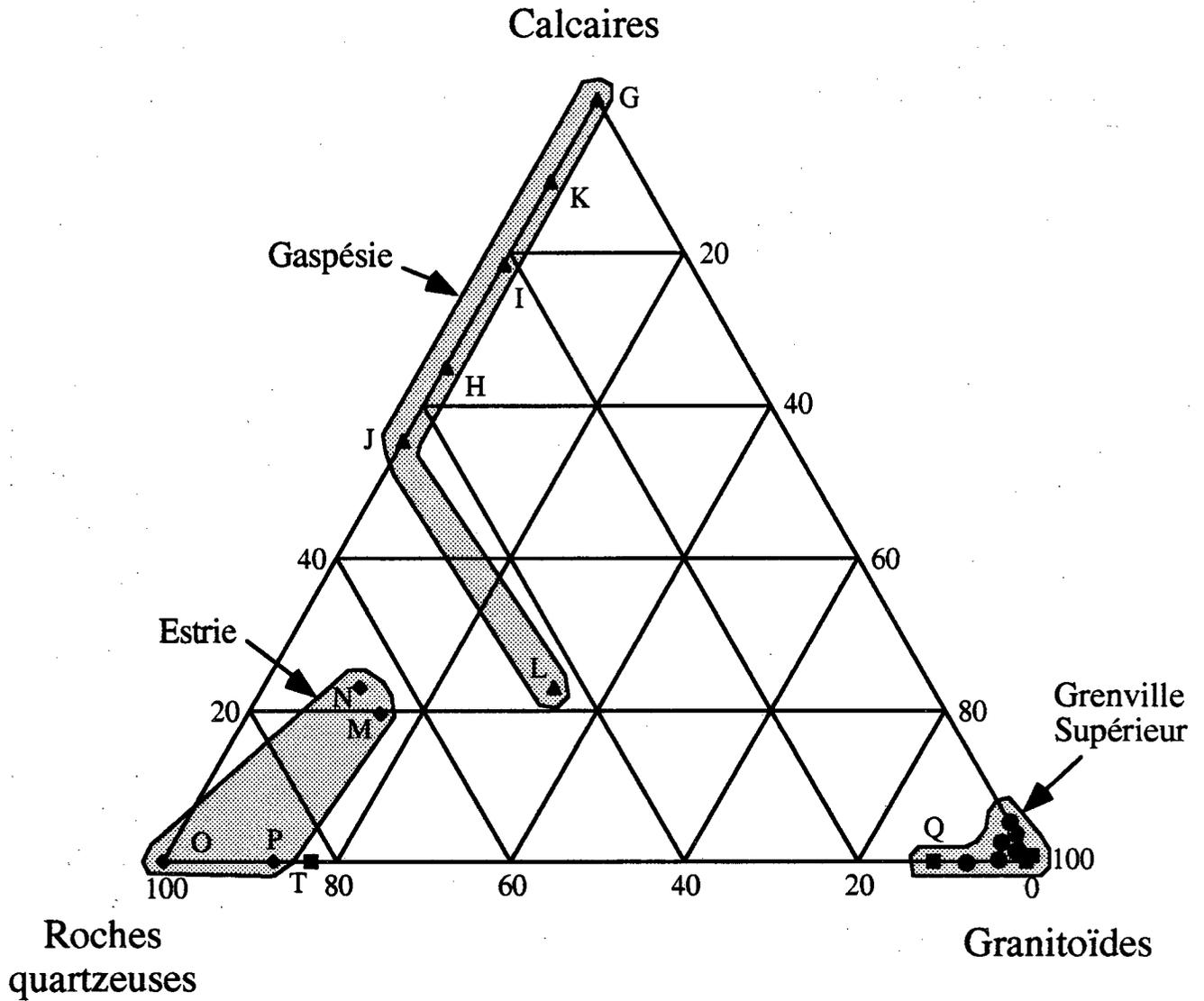


Figure 6. Diagramme ternaire Roches quartzéuses - Granitoïdes - Calcaires dans les graviers. Les roches quartzéuses comprennent le grès, le grauwaacke et la quartzite. Les faciès granitoïdes comprennent les roches ignées intrusives (granite, diorite, etc.) et leurs équivalents métamorphiques (gneiss, etc.).

On peut constater ce qui suit: (1) Les graviers du Grenville et du Supérieur sont presque exclusivement constitués de roches granitoïdes, sauf le gravier réactif de référence (T), qui est beaucoup plus proche de certains graviers de l'Estrie (O, P). (2) Ceux de la Gaspésie sont très variables en composition mais contiennent tous des quantités importantes de calcaire, mais pas de faciès granitoïdes, à l'exception de l'échantillon L (plus gréseux et contenant de tels faciès). Rappelons que ce gravier est le seul qui a été échantillonné dans la partie nord de la péninsule gaspésienne. (3) Les graviers de l'Estrie sont surtout constitués de roches quartzieuses; ces graviers se divisent encore en deux sous-groupes selon qu'ils contiennent ou non des calcaires, quoique toujours en quantités plus faibles que dans les graviers de la Gaspésie.

La composition pétrographique des échantillons de gravier est en bon accord avec les résultats d'analyse chimique discutés plus haut. Par exemple, les graviers du Grenville et du Supérieur, riches en faciès granitoïdes et donc en feldspath, présentent les contenus les plus élevés en sodium et en aluminium; les graviers des Appalaches présentent aussi des contenus en aluminium relativement élevés, associés cette fois à la présence de schistes en quantités significatives (minéraux argileux); les graviers les plus riches en roches quartzieuses sont également les plus riches en SiO_2 (O, P), alors que les plus riches en calcaires présentent les pertes au feu et les contenus en CaO les plus élevés, de même que les plus faibles pourcentages de résidus insolubles.

L'examen mégascopique permet déjà de «soupçonner» certains granulats de réactivité alcaline. Certaines lithologies déjà reconnues antérieurement comme réactives sont en effet observées dans les échantillons (grès, grauwackes, schistes, quartzites, calcaires, andésites...). Ces «soupçons» doivent toutefois être corroborés par l'observation microscopique en lames minces de phases siliceuses susceptibles de réactivité alcalis-silice.

Les graviers granitiques du Grenville et du Supérieur présentent en moyenne de meilleurs nombres pétrographiques que les graviers lithiques de la Gaspésie et de l'Estrie (tableau 11). Le nombre pétrographique reflète toutefois la performance mécanique globale attendue des granulats examinés, mais aucunement leur performance chimique dans le béton.

4.3 EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE MICROSCOPIQUE

L'examen pétrographique en lames minces des granulats a été effectué sur les plaques ayant servi à l'essai de production de gel («gel pat test») discuté ci-après, après repolissage de ces plaques. Cet examen permet au pétrographe de reconnaître la présence de phases potentiellement réactives et, dans bien des cas, de prédire ou d'expliquer qualitativement le comportement des granulats dans le béton. Il peut à la limite servir de critère d'acceptation ou de refus; à tout le moins, il permet d'orienter le choix des essais subséquents. Les principaux points qui ont retenu notre attention lors de cet examen sont les phases minérales en présence ainsi que leurs caractéristiques texturales. On a accordé une importance particulière aux phases siliceuses potentiellement réactives en notant leur nature, leur abondance relative, leur granulométrie et leur morphologie.

Les variétés de silice déjà reconnues comme réactives dans le béton sont regroupées au tableau 2. Le tableau 3 présente quant à lui une liste des roches réactives correspondantes. Plusieurs de ces phases ou roches potentiellement réactives ont été effectivement reconnues dans nos échantillons par pétrographie mégascopique et/ou microscopique, comme on peut le constater au tableau 11. En tenant compte de l'abondance relative de ces roches et phases dans les échantillons de gravier, nous avons attribué à chacun de ces derniers une cote pétrographique variant de 1 à 3 selon leur potentiel de réactivité alcaline dans le béton (1: faible à nul; 2: moyen; 3: élevé). Ces cotes sont reportées sur la figure 7.

Tous les granulats granitiques du Grenville se sont vu attribuer la cote 1 (potentiel de réactivité faible à nul). Ces granulats présentent en quantités variables du quartz granulaire à extinction roulante. La présence de ce seul minéral ne devrait pas poser problème. Grattan-Bellew (1987) a d'ailleurs mis en doute la réactivité du quartz à extinction roulante, prétextant que celui-ci, ayant été déformé, a libéré ses contraintes internes. Cet auteur attribue plutôt la réactivité des granulats correspondants à la coexistence de quartz microcristallin. Mentionnons que le gravier D contient aussi des particules de calcaires siliceux contenant de la silice microcristalline, mais toutefois pas en quantités suffisantes pour faire changer sa cote. Les essais subséquents viendront confirmer les cotes pétrographiques très positives attribuées aux graviers du Grenville.

Une cote pétrographique de 2 (potentiel moyen de réactivité) a été attribuée aux graviers R et S de l'Abitibi (Supérieur). Ces deux graviers contiennent tous du quartz à extinction roulante et du quartz microcristallin. Les granulats d'origine volcanique (andésite) qu'ils contiennent, malgré leur contenu en quartz roulant et microcristallin, ne devraient toutefois pas être à la

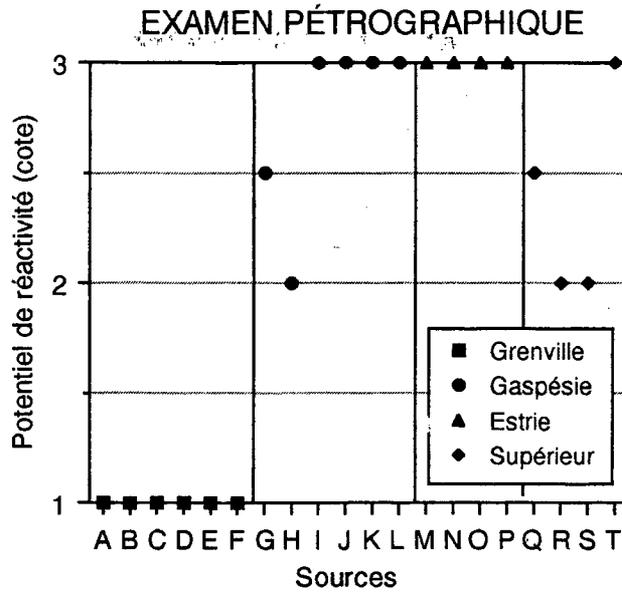


Figure 7. Cotes attribuées aux graviers lors de l'examen pétrographique en lames minces quant à leur potentiel de réactivité alcaline dans le béton (1: faible à nul; 2: moyen; 3: élevé).

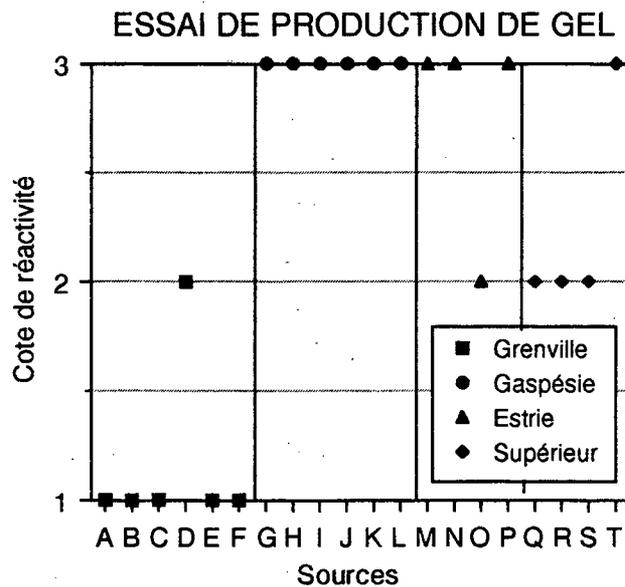


Figure 8. Cotes attribuées aux graviers lors de l'essai de production de gel (1: non réactif; 2: marginalement réactif; 3: réactif).

source de problèmes dans le béton. Par contre, les gravillons d'origine sédimentaire contenant du quartz cryptocristallin sont sans doute plus susceptibles de réactivité. L'autre échantillon de l'Abitibi (Q) contient effectivement du quartz cryptocristallin dans le ciment des particules de grauwacke qu'il contient en quantités significatives (9%) et a donc reçu une cote moins bonne de 2-3. Quant au témoin réactif de référence ontarien (T), également de la province géologique du Supérieur, il est très riche en particules de grès-grauwackes (60%) et s'est donc vu attribuer la cote la moins bonne (3).

Les granulats lithiques de la Gaspésie (Appalaches) se sont vu attribuer des cotes variant de 2 à 3, indiquant que leur potentiel «pétrographique» de réactivité varie de moyen à élevé. Ces graviers contiennent une grande variété de faciès pétrographiques (roches). Ils contiennent pour la plupart une bonne proportion de calcaire impur, avec des traces de chert et/ou un fin réseau de silice micro à cryptocristalline interstitielle aux carbonates. Dans les grès et les grauwackes, on note la présence de quartz micro et cryptocristallin, quelquefois associé au ciment sédimentaire. La cote attribuée à ces granulats varie en fait selon la présence ou l'absence de quartz cryptocristallin et l'abondance respective des phases potentiellement réactives observées. La plupart de ces échantillons ont d'ailleurs mal performé lors des essais subséquents.

Les granulats lithiques provenant de l'Estrie ont tous reçu la cote 3 (potentiel élevé de réactivité). Ils présentent eux-aussi des lithologies très variées. On y retrouve essentiellement des roches sédimentaires, mais surtout des grès et des grauwackes, ainsi que quelques faciès volcaniques et métamorphiques. Ils contiennent tous du quartz à extinction roulante, du quartz microcristallin et, pour la plupart, du quartz cryptocristallin. La cote correspond généralement assez bien avec les résultats des essais subséquents.

4.4 ESSAI DE PRODUCTION DE GEL («GEL PAT TEST»)

Dans notre cas, cet essai a été réalisé sur des plaques polies de béton provenant du même mélange que pour l'essai du prisme de béton ACNOR A23.2-14A. L'essai a donc été effectué sur des particules de 5-20 mm de gravier. Nous en discuterons maintenant en raison des corrélations pétrographiques qu'on peut en tirer.

Les deux principaux critères retenus pour l'appréciation de la réactivité des graviers testés sont le temps d'apparition et la quantité du gel observé à la surface des particules. Les résultats présentés au tableau 11 et illustrés à la figure 8 sont ceux obtenus après 28 jours de trempage des plaques de béton polies dans la solution de NaOH 1N à 38°C. Les globules de gel étaient

concentrés le long de la schistosité et/ou du litage des particules, lorsque qu'il y en avait; on trouvait également dans certains cas du gel à l'interface pâte/granulat.

Les graviers ont été classés selon trois niveaux de réactivité: (1) non réactif, (2), marginalement réactif, et (3) réactif. On remarque que cinq échantillons du Grenville sur six ont été classés non réactifs, l'autre (D) se classant marginalement réactif, tout comme les trois graviers du Supérieur québécois et un autre de l'Estrie (O). Tous les autres granulats ont été classés réactifs à l'essai de production de gel, dont les six échantillons de la Gaspésie, trois des quatre échantillons de l'Estrie, et le gravier de référence T.

Il faut noter que les résultats présentés ici sont pour des périodes de 28 jours de trempage, mais que l'essai fut poursuivi jusqu'à 56 jours. Cela se révéla inutile car après un tel délai, la quantité de gel et de chaux présents à la surface de certaines plaques rendait impossible toute observation. Le temps de réponse de l'essai, toujours à 38°C, semble toutefois plus long dans le cas des granulats calcaires pour lesquels une échéance de 56 jours semble plus appropriée (Fournier & Bérubé 1993).

En fait, le principal intérêt de l'essai de production de gel est qu'il peut permettre, dans un échantillon polygénique, de différencier les faciès réactifs de ceux qui ne le sont pas. Il est donc particulièrement intéressant dans le cas des graviers lithiques. Certains granulats sont en effet recouverts de dépôts blanchâtres, alors que d'autres en sont totalement dépourvus. Dans le cas des échantillons du Grenville, surtout constitués de faciès gneissiques et granitoïdes (contenant du quartz à extinction roulante), les dépôts de gel observables étaient insignifiants, d'où l'attribution de la cote 1, à une exception près: le gravier D. Des globules de gels étaient en effet observés à la surface des particules de calcaires siliceux présentes dans ce dernier échantillon, le seul d'ailleurs du Grenville à en contenir. Pour les échantillons du Supérieur, les dépôts de gel les plus importants se trouvaient à la surface des faciès les plus déformés, tels les granites gneissiques et les schistes métamorphiques, lesquels renferment tous du quartz microcristallin, et quelquefois cryptocristallin. Pour les échantillons de la Gaspésie et de l'Estrie, les dépôts de gel les plus abondants se trouvaient à la surface des particules de calcaire siliceux, mais également des faciès gréseux renfermant du quartz micro et cryptocristallin dans leur matrice, ainsi que des schistes métamorphiques et argileux qui, en général, contiennent du quartz microcristallin ou d'autres formes de silice instable.

Somme toute, l'essai de production de gel est rapide, simple et efficace. Les résultats demeurent toutefois fondés sur une appréciation visuelle qualitative et, doivent donc être confirmés par des essais plus quantitatifs.

4.5 ESSAIS DE LA MÉTHODE CHIMIQUE ASTM C289 ET DE LA MÉTHODE CHIMIQUE MODIFIÉE (ASTM C289 SUR RÉSIDUS INSOLUBLES)

Les résultats obtenus pour les essais de la méthode chimique ASTM C289 et de la méthode chimique modifiée (c'est-à-dire ASTM C289 sur résidus insolubles) sont présentés au tableau 12 et à la figure 9. Les valeurs obtenues avec la méthode modifiée ont été corrigées afin de tenir compte de la quantité de résidus insolubles présents dans les échantillons. Il est à noter que des échantillons de 25 g de résidus insolubles ont pu être testés ici, conformément à la norme ASTM.

On remarque immédiatement une disparité effarante entre les deux séries de résultats. Pour les graviers, trois échantillons seulement (G, K, N) se classent potentiellement réactifs ou réactifs selon la méthode normalisée, ce qui n'inclut malheureusement pas le témoin réactif (T), alors qu'ils se classent tous réactifs selon la méthode modifiée (figure 9A). On observe le même phénomène pour les sables: un seul échantillon est potentiellement réactif selon la méthode normalisée (G), alors qu'ils sont tous réactifs selon la méthode modifiée (figure 9B). Notons qu'une telle disparité entre les deux méthodes a déjà été observée dans le cas de certains sables de l'Estrie (Bérard & Roux 1986), de même que de plusieurs granulats silicatés de carrières du Québec (Ouellet 1988, Bérubé et al. 1989a, Bérubé & Fournier 1990, 1992).

La présence de carbonates, en quantités variables mais peut-être suffisantes dans tous les échantillons testés, (ils en contiennent tous au moins 2%), pourrait expliquer à elle seule pourquoi la quasi-totalité des échantillons passent de la zone non réactive aux zones réactive ou potentiellement réactive lors de l'essai modifié. On a déjà constaté par exemple que moins de 3% de carbonates dans des tufs rhyolitiques très réactifs de la Beauce pouvait empêcher leur détection à l'essai normalisé (Ouellet 1988). Il est toutefois assez surprenant que les seuls échantillons qui ont échoué l'essai normalisé (graviers G, K et N, sable G), et ce même après correction pour leur contenu en insolubles, soient malgré tout très riches en carbonates ($\geq 17\%$). On s'étonne encore davantage de constater que même les échantillons de composition granitique échouent l'essai modifié, et que les sables lithiques ne performent pas mieux à cet essai que les graviers de même provenance, comme nous l'avions constaté par le passé (Bérubé et al. 1987; voir tableau 1), phénomène que nous avons associé au concassage que subissent les graviers pour l'essai, alors que les sables n'exigent habituellement qu'un simple tamisage.

Une chose est sûre: dans un cas comme dans l'autre, les résultats obtenus ici sont incompatibles avec ceux obtenus aux autres essais discutés ci-après. On verra en effet que de nombreux échantillons réactifs à l'essai chimique modifié, et même à l'essai chimique normalisé (graviers G et K, sable G), s'en tireront fort bien. On en conclut que l'essai

TABLEAU 12

Résultats des essais de la méthode chimique normalisée ASTM C289 et de la méthode chimique modifiée.

Source	Graviers							Sables						
	Essai normalisé		Essai modifié		Essai modifié pondéré			Essai normalisé		Essai modifié		Essai modifié pondéré		
	Rc mmole/l	Sc mmole/l	Rc mod mmole/l	Sc mod mmole/l	Rés.ins. %	Rc* mod mmole/l	Sc* mod mmole/l	Rc mmole/l	Sc mmole/l	Rc mod mmole/l	Sc mod mmole/l	Rés.ins. %	Rc* mod mmole/l	Sc* mod mmole/l
A	20	14	21	63	94,2	20	59	17	15	13	40	98,1	13	39
B	27	12	10	100	95,4	10	95	21	12	17	47	97,4	17	46
C	7	11	8	57	96,9	8	55	16	13	11	55	97,6	11	54
D	26	10	15	55	91,8	14	50	17	12	9	51	94,6	9	48
E	7	10	18	49	97,2	17	48	34	17	17	87	91,0	15	79
F	27	11	18	155	93,0	17	144	25	13	10	74	96,2	10	71
G	145	290	112	642	59,5	67	382	132	288	98	580	65,3	64	379
H	60	24	64	350	64,4	41	225	82	28	70	275	62,6	44	172
I	70	31	54	202	68,7	37	139	61	31	42	148	75,4	32	112
J	60	39	41	281	75,6	31	212	74	44	52	252	78,0	41	197
K	124	138	114	526	47,0	54	247	43	36	36	140	96,6	35	135
L	41	19	19	85	83,4	16	71	50	33	35	180	56,9	20	102
M	32	19	21	123	81,1	17	100	20	20	21	77	92,8	19	71
N	49	57	32	223	82,9	27	185	25	23	26	76	94,9	25	72
O	22	34	21	83	96,9	20	80	23	27	21	100	96,7	20	97
P	23	36	18	139	96,6	17	134	32	33	28	92	97,8	27	90
Q	44	17	8	35	97,9	8	34	58	20	23	105	88,6	20	93
R	18	15	10	43	97,7	10	42	20	14	13	45	97,9	13	44
S	8	18	6	45	97,4	6	44	14	19	3	96	96,9	3	93
T	8	23	16	47	98,0	16	46	-	-	-	-	-	-	-

$$Sc^* \text{ mod.} = Sc \text{ mod.} \times (\% \text{ Rés.ins./100}) \quad Rc^* \text{ mod.} = Rc \text{ mod.} \times (\% \text{ Rés.ins./100})$$

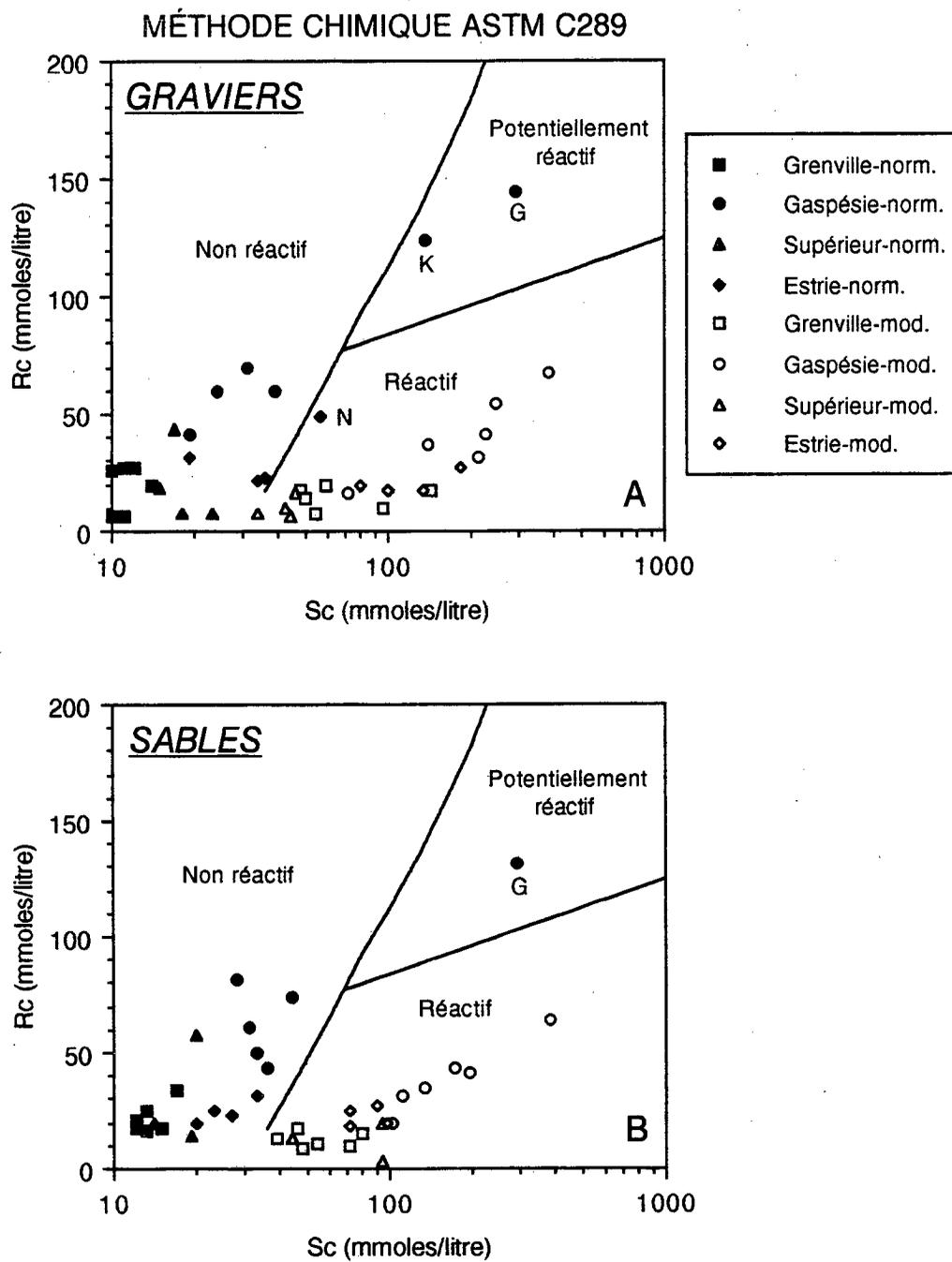


Figure 9. Résultats des essais chimiques normalisé (ASTM C289) et modifié (ASTM C289 sur résidus insolubles) obtenus pour les graviers (A) et les sables (B).

normalisé de la méthode chimique est peu fiable. D'abord, il est trop permissif, en laissant passer 84% (16/19) des graviers québécois et 95% (18/19) des sables, tout en étant par ailleurs trop sévère pour certains granulats. Pour sa part, l'essai modifié, lorsqu'il est interprété conformément à la norme ASTM C289, est décidément beaucoup trop sévère, puisqu'il refuse tous les granulats naturels du Québec.

L'essai modifié apparaît cependant plus réaliste, c'est-à-dire ni trop permissif ni trop sévère, lorsqu'on ne considère que la quantité de silice dissoute (S_c) et une valeur-limite de 100 mmoles/litre afin de différencier les granulats non réactifs des autres, ainsi que recommandé d'ailleurs par plusieurs auteurs (Bérubé & Fournier 1992). Sur cette base, 53% des graviers et 68% des sables québécois s'en tirent bien, dont tous les échantillons du Grenville et du Supérieur, sauf le gravier F. Notons que les sables libèrent globalement moins de silice que les graviers de même provenance (figure 10) et s'en sortent donc relativement mieux, ce qui peut encore une fois être attribué au concassage subi par les graviers. Toutefois, fait beaucoup plus inquiétant, le gravier réactif de référence satisfait à la valeur-limite suggérée. Par ailleurs, d'autres échantillons qui persistent encore à se classer réactifs sur la base d'une telle limite s'en tireront fort bien ci-après. Plusieurs des résultats n'en demeurent donc pas moins incompatibles avec ceux des essais d'expansion discutés ci-après, considérés comme plus réalistes, ce qui nous permet de douter aussi de la validité de l'essai chimique modifié et de la limite suggérée de 100 mmoles/litre de silice dissoute.

Somme toute, les deux essais chimiques, normalisé et modifié, ne sont pas du tout recommandés dans le cas des granulats naturels, puisqu'ils s'avèrent globalement trop permissifs (essai normalisé) ou trop sévères (essai modifié), et qu'ils donnent des résultats incompatibles avec ceux obtenus lors des essais d'expansion sur mortier et sur béton, essais considérés par tous comme étant plus réalistes et plus fiables.

4.6 ESSAI DE LA BARRE DE MORTIER ASTM C227

Dans cette étude, nous avons utilisé des contenants (seaux hermétiques en plastique) sans matériau absorbant sur les parois intérieures, de façon à limiter le lessivage des alcalis. Nous avons également augmenté la teneur en alcalis du ciment à 1,25% Na_2O éq. par une addition de NaOH à l'eau de gâchage, et nous avons fixé le rapport eau/ciment à 0,50 sans égard à l'étalement obtenu pour les mélanges de mortier.

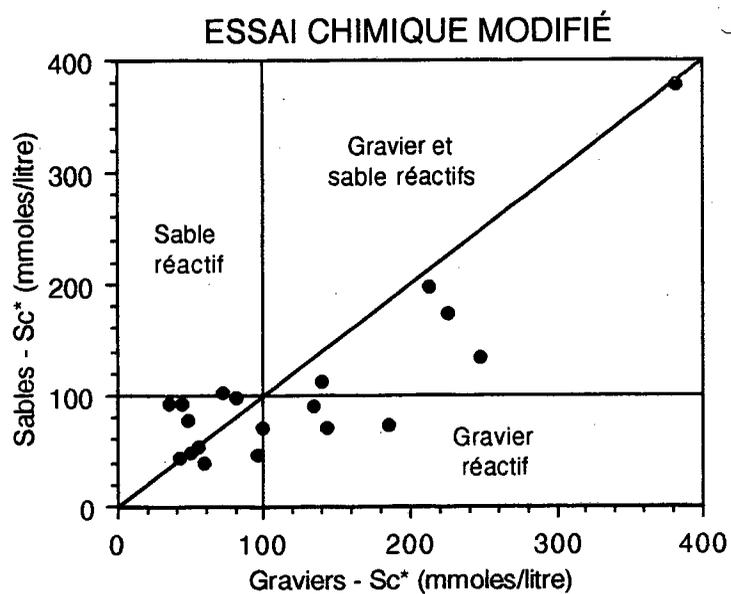


Figure 10. Comparaison entre les valeurs corrigées de silice dissoute (Sc^*) obtenues pour les sables et les graviers lors de l'essai chimique modifié. ($Sc^* = Sc \times \% \text{ résidus insolubles}/100$).

Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux 13 et 14, et aux figures 11 et 12. En excluant le gravier réactif de référence T, 68% (13/19) des graviers et 63% (12/19) des sables québécois satisfont aux limites d'expansion suggérées de 0,05% à 6 mois et de 0,10% à 1 an, dont tous les échantillons du Grenville et du Supérieur québécois, sauf le sable E, par ailleurs le seul sable testé du Grenville à contenir passablement de carbonates (9%). À l'opposé, tous les échantillons de l'Estrie dépassent l'une ou l'autre des limites permises. Les résultats sont plus partagés dans le cas des échantillons de la Gaspésie, dont environ la moitié s'en sortent mal, soit deux graviers (J, K) et trois sables (I, J, L).

On notera qu'il n'y a pas correspondance totale entre les graviers et les sables réactifs de Gaspésie (figure 13). En effet, le sable I se classe réactif, quoique de façon très marginale (0,051% à 6 mois mais 0,078% à 1 an), pendant que le gravier correspondant, de même composition, s'en sort à peine. Par contre, les écarts beaucoup plus importants observés entre les échantillons des sources E, K et L pourraient s'expliquer cette fois par des différences de composition chimique et pétrographique (figure 13): le sable E, réactif mais à peine, est plus riche en carbonates (RI = 91%) que le gravier E (RI = 97%), non réactif; le sable K, non réactif, est très pauvre en carbonates (RI = 97%), contrairement au gravier K, nettement réactif et très riche en particules calcaires (RI = 47%); le sable L, nettement réactif, est pour sa part plus riche en carbonates (RI = 57%) que le gravier L (RI = 83%), non réactif, mais à peine, à l'essai ASTM C227.

Somme toute, l'essai de la barre de mortier semble donner d'assez bons résultats, sans doute parce qu'il a été effectué dans des conditions adéquates (teneur en alcalis du ciment augmentée à 1,25% Na₂O éq., contenant sans matériau absorbant, rapport e/c de 0,50). Toutefois, il risque encore de laisser filer certains granulats réactifs, comme ce fut presque le cas du granulats réactif de référence T (expansions très marginales de 0,055% à 6 mois et de 0,098% à 1 an), et nous verrons ci-après qu'il pourrait aussi s'avérer trop sévère pour d'autres granulats. De plus, il faut mentionner que l'utilisation d'une seule limite d'expansion de 0,10% à 1 an est plutôt risquée, considérant que les courbes d'expansion commencent souvent à plafonner bien avant, sans doute en raison du lessivage des alcalis des barres de mortier; à preuve, certains échantillons ne satisfont pas à la limite de 0,05% à 6 mois, plus sécuritaire, alors qu'ils satisfont à la limite de 0,10% à 1 an. C'est notamment le cas du gravier de référence T et des sables E, I et J.

TABLEAU 13
Résultats de l'essai de la barre de mortier ASTM C227 sur les graviers.

Source	Temps (jours) - Expansions (%)											
	0	14	28	56	84	112	184	244	304	365	450	530
A	0,0000	0,0093	0,0186	0,0226	0,0292	0,0285	0,0342	0,0302	0,0388	0,0405	0,0537	0,0557
B	0,0000	0,0106	0,0175	0,0222	0,0294	0,0271	0,0288	0,0301	0,0357	0,0384	0,0493	0,0543
C	0,0000	0,0046	0,0172	0,0245	0,0282	0,0305	0,0312	0,0341	0,0421	0,0431	0,0577	0,0557
D	0,0000	0,0063	0,0143	0,0206	0,0236	0,0266	0,0309	0,0343	0,0413	0,0423	0,0462	0,0549
E	0,0000	0,0023	0,0126	0,0232	0,0222	0,0259	0,0275	0,0288	0,0345	0,0391	0,0474	0,0507
F	0,0000	0,0043	0,0113	0,0222	0,0189	0,0252	0,0252	0,0282	0,0392	0,0402	0,0481	0,0541
G	0,0000	0,0027	0,0169	0,0305	0,0447	0,0493	0,0470	0,0536	0,0649	0,0596	0,0741	0,0771
H	0,0000	0,0020	0,0103	0,0156	0,0232	0,0295	0,0451	0,0451	0,0796	0,0835	0,1081	0,1064
I	0,0000	0,0057	0,0126	0,0206	0,0276	0,0346	0,0482	0,0675	0,0835	0,0842	0,0891	0,0988
J	0,0000	0,0047	0,0146	0,0233	0,0336	0,0482	0,0831	0,1180	0,1559	0,1623	0,1623	0,1739
K	0,0000	0,0046	0,0126	0,0312	0,0625	0,0658	0,1271	0,1540	0,1637	0,1703	0,1783	0,1873
L	0,0000	0,0046	0,0129	0,0232	0,0295	0,0384	0,0440	0,0685	0,0933	0,0983	0,1277	0,1281
M	0,0000	0,0126	0,0215	0,0291	0,0414	0,0460	0,0569	0,0791	0,1079	0,1132	0,1486	0,1635
N	0,0000	0,0037	0,0156	0,0260	0,0366	0,0479	0,0815	0,0915	0,1318	0,1554	0,1714	0,1757
O	0,0000	0,0066	0,0172	0,0228	0,0351	0,0437	0,0615	0,0701	0,1102	0,1211	0,1485	0,1545
P	0,0000	0,0116	0,0199	0,0265	0,0382	0,0428	0,0587	0,0906	0,1211	0,1719	0,1991	0,2177
Q	0,0000	0,0126	0,0222	0,0252	0,0315	0,0351	0,0454	0,0500	0,0656	0,0729	0,0901	0,0944
R	0,0000	0,0109	0,0179	0,0229	0,0322	0,0322	0,0355	0,0404	0,0497	0,0603	0,0759	0,0799
S	0,0000	0,0113	0,0212	0,0245	0,0354	0,0291	0,0464	0,0473	0,0629	0,0712	0,0964	0,1003
T	0,0000	0,0050	0,0150	0,0196	0,0286	0,0379	0,0553	0,0659	0,0992	0,0982	0,1209	0,1209

TABLEAU 14
 Résultats de l'essai de la barre de mortier ASTM C227 sur les sables.

Source	Temps (jours) - Expansions (%)											
	0	14	28	56	84	112	184	244	304	365	450	530
A	0,0000	0,0123	0,0206	0,0256	0,0296	0,0309	0,0369	0,0349	0,0393	0,0419	0,0562	0,0556
B	0,0000	0,0146	0,0189	0,0302	0,0325	0,0332	0,0381	0,0332	0,0401	0,0401	0,0511	0,0590
C	0,0000	0,0080	0,0209	0,0272	0,0285	0,0328	0,0371	0,0322	0,0418	0,0411	0,0590	0,0653
D	0,0000	0,0137	0,0176	0,0213	0,0233	0,0300	0,0360	0,0363	0,0393	0,0463	0,0539	0,0536
E	0,0000	0,0140	0,0203	0,0286	0,0336	0,0420	0,0550	0,0526	0,0576	0,0696	0,0823	0,0869
F	0,0000	0,0086	0,0176	0,0209	0,0263	0,0269	0,0279	0,0309	0,0382	0,0389	0,0495	0,0539
G	0,0000	0,0090	0,0213	0,0280	0,0363	0,0336	0,0373	0,0419	0,0476	0,0479	0,0609	0,0616
H	0,0000	0,0113	0,0156	0,0149	0,0229	0,0288	0,0401	0,0434	0,0557	0,0564	0,0637	0,0773
I	0,0000	0,0073	0,0119	0,0215	0,0245	0,0341	0,0507	0,0547	0,0762	0,0778	0,1325	0,1444
J	0,0000	0,0123	0,0210	0,0230	0,0349	0,0436	0,0622	0,0672	0,0775	0,0769	0,0785	0,0922
K	0,0000	0,0130	0,0150	0,0299	0,0336	0,0329	0,0406	0,0402	0,0496	0,0449	0,0499	0,0665
L	0,0000	0,0116	0,0213	0,0336	0,0485	0,0538	0,1017	0,1356	0,1655	0,1689	0,1868	0,2194
M	0,0000	0,0050	0,0193	0,0283	0,0409	0,0526	0,0689	0,1005	0,1421	0,1617	0,1923	0,1960
N	0,0000	0,0106	0,0201	0,0363	0,0466	0,0760	0,1123	0,1341	0,1588	0,1697	0,2533	0,2704
O	0,0000	0,0170	0,0183	0,0319	0,0413	0,0493	0,0915	0,1231	0,1341	0,1680	0,2076	0,2203
P	0,0000	0,0083	0,0220	0,0283	0,0373	0,0396	0,0503	0,0752	0,1062	0,1102	0,1318	0,1368
Q	0,0000	0,0080	0,0073	0,0239	0,0298	0,0295	0,0404	0,0461	0,0530	0,0547	0,0596	0,0692
R	0,0000	0,0140	0,0166	0,0256	0,0329	0,0339	0,0416	0,0472	0,0542	0,0549	0,0619	0,0732
S	0,0000	0,0183	0,0236	0,0260	0,0330	0,0376	0,0466	0,0483	0,0589	0,0549	0,0629	0,0766

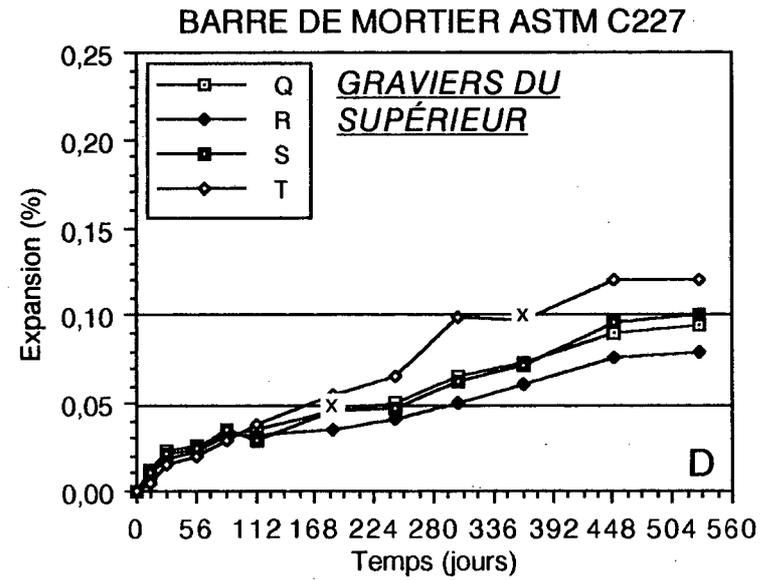
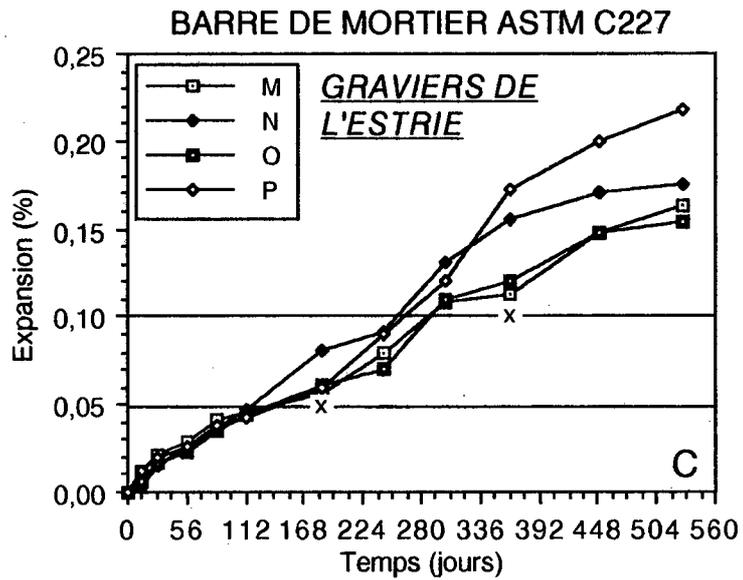
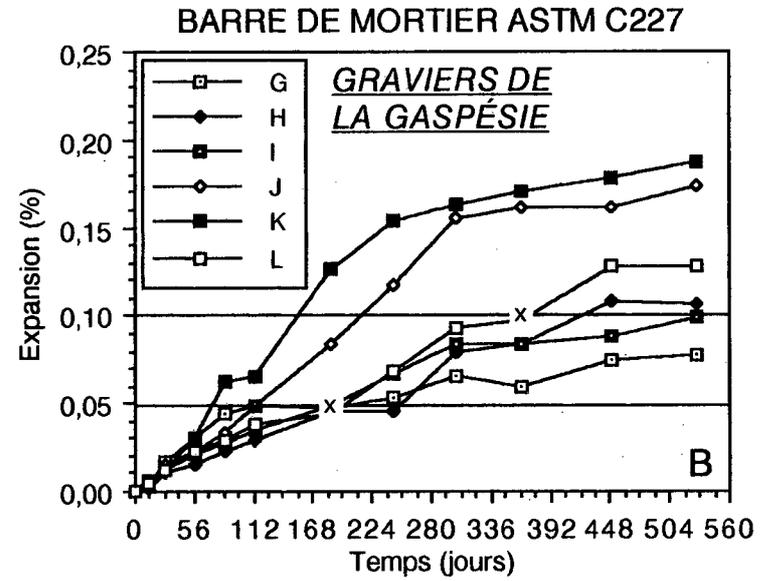
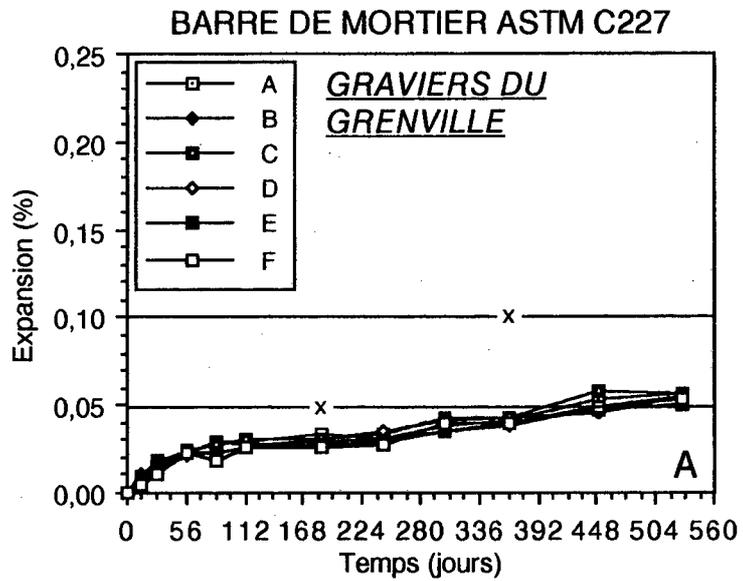


Figure 11. Résultats de l'essai de la barre de mortier ASTM C227 pour les graviers. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.

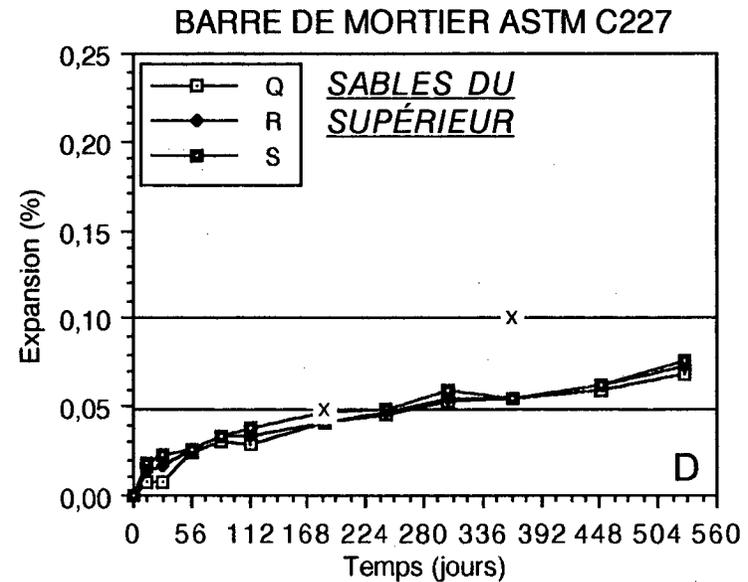
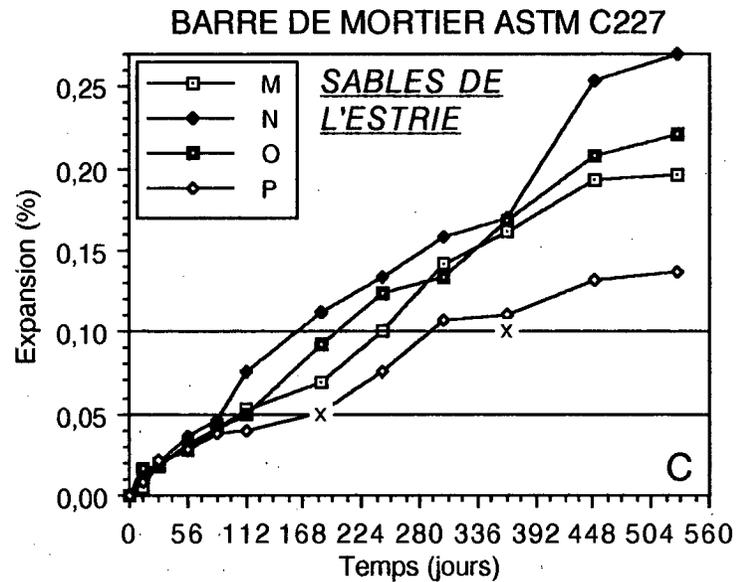
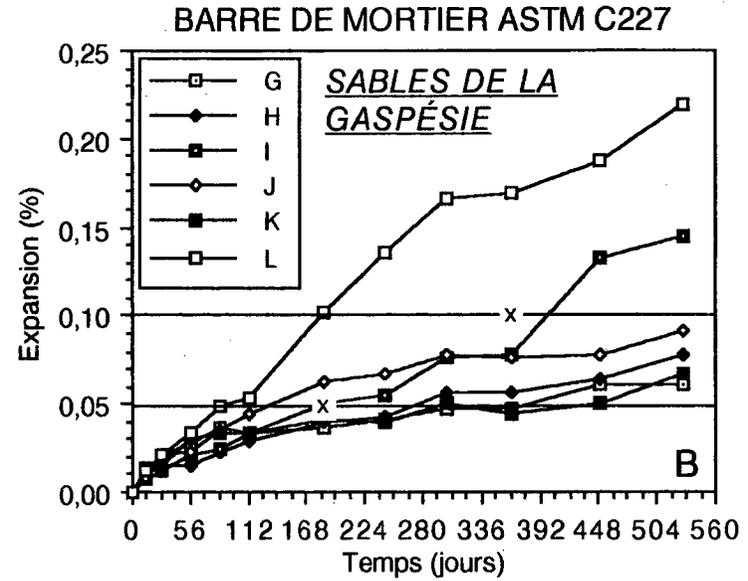
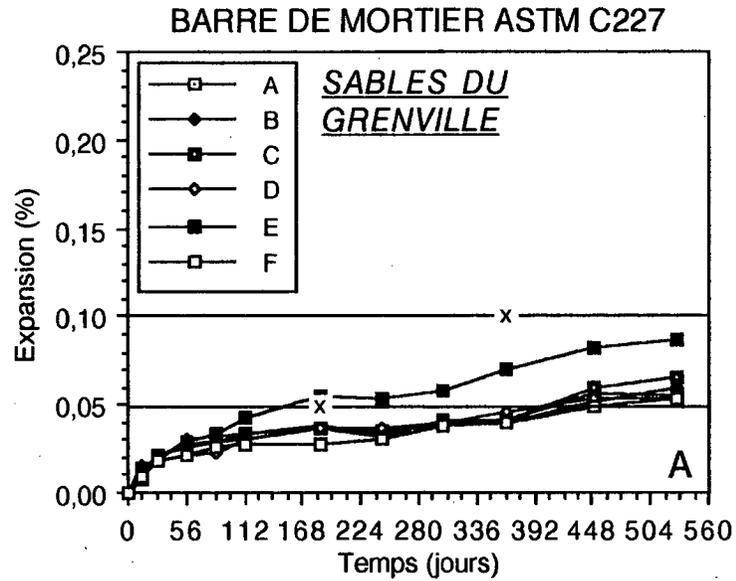


Figure 12. Résultats de l'essai de la barre de mortier ASTM C227 pour les sables. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.

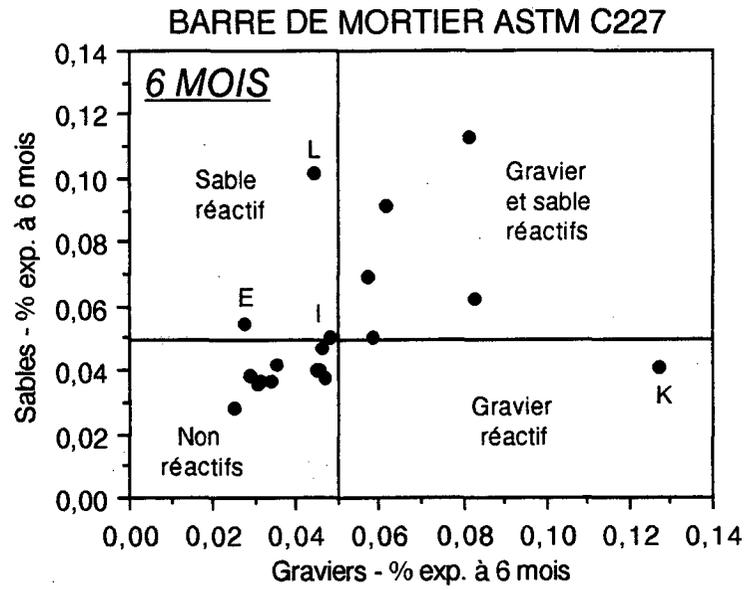


Figure 13. Comparaison entre les résultats obtenus à six mois pour les sables et les graviers lors de l'essai de la barre de mortier ASTM C227.

4.7 ESSAI ACCÉLÉRÉ DE LA BARRE DE MORTIER ASTM C9-PROPOSAL-P214 (DIT «SUD-AFRICAÏN»)

Cet essai a été poursuivi jusqu'à 21 jours. Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux 15 et 16 et aux figures 14 et 15. Globalement, seulement 32% (6/19) des graviers québécois et 37% (7/19) des sables satisfont à la limite d'expansion de 0,15% à 14 jours suggérée par Grattan-Bellew (1990) pour les granulats autres que les calcaires et les grauwackes, dont cependant tous les échantillons du Grenville sauf un, une fois de plus le sable E, qui se distingue des autres sables du Grenville par son contenu appréciable en carbonates (9%). À l'opposé encore une fois, tous les échantillons de l'Estrée dépassent la limite précédente, mais aussi tous ceux du supérieur, incluant le témoin réactif T. Les résultats sont plus partagés, quoique pas tellement plus édifiants, dans le cas des échantillons de la Gaspésie: seulement deux sables sont classés non réactifs sur un total de 12 échantillons. Somme toute, il est clair que cet essai accéléré est beaucoup trop sévère, particulièrement à l'égard des échantillons de l'Abitibi.

Une limite d'acceptation moins sévère de 0,20% d'expansion à 14 jours (au lieu de 0,15%), comme nous l'avons déjà proposé (Bérubé et al. 1992a), ferait tout juste un peu mieux, en entraînant l'acceptation de 47% (9/19) des graviers et de 42% (8/19) des sables, soit toujours le refus d'un sable du Grenville (E), de deux sables (R, S), et d'un gravier (S) de l'Abitibi, et de 85% (17/20) des échantillons des Appalaches de la Gaspésie et de l'Estrée, ce qui est encore beaucoup trop sévère et peu conforme à la véritable performance en service de ces matériaux. Considérant le peu de changements apportés par une telle modification, nous retiendrons donc comme limite d'expansion une valeur de 0,15% à 14 jours.

On peut également constater sur la figure 16 que les sables sont généralement moins expansifs (en valeur absolue) que les graviers de même provenance, mais il y a une assez bonne correspondance entre les graviers et les sables réactifs, sauf dans le cas des sources E (sable réactif), G (gravier très marginalement réactif) et K (gravier nettement réactif et sable marginalement non réactif). On l'a déjà mentionné, les échantillons de sable et de gravier diffèrent dans le cas des sources E (sable plus calcaire) et K (gravier plus calcaire). Quant à la source G, rappelons que le gravier n'est que très marginalement réactif (0,151% à 14 jours).

Considérant que cet essai est probablement le plus sévère auquel les granulats ont été soumis, on ne doit surtout pas l'utiliser comme critère de refus. Toutefois, il peut servir de norme d'acceptation et, à ce titre, peut se révéler fort utile, particulièrement pour les granulats de composition granitique.

TABLEAU 15

Résultats de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 sur les graviers.

Source	Temps (jours) - Expansions (%)							
	0	1	3	5	7	11	14	21
A	0,0000	0,0330	0,0090	0,0133	0,0180	0,0480	0,0636	0,1286
B	0,0000	0,0046	0,0143	0,0182	0,0285	0,0424	0,0607	0,1180
C	0,0000	0,0043	0,0096	0,0143	0,0298	0,0471	0,0640	0,0988
D	0,0000	0,0060	0,0149	0,0195	0,0301	0,0480	0,0619	0,1000
E	0,0000	0,0060	0,0106	0,0239	0,0282	0,0419	0,0538	0,0917
F	0,0000	0,0120	0,0209	0,0306	0,0419	0,0761	0,1090	0,1552
G	0,0000	0,0229	0,0848	0,1097	0,1180	0,1389	0,1512	0,2101
H	0,0000	0,0023	0,0266	0,1360	0,2214	0,3335	0,3877	0,4775
I	0,0000	0,0026	0,0360	0,1174	0,1715	0,2708	0,3130	0,4001
J	0,0000	0,0196	0,0941	0,1716	0,2364	0,3229	0,3784	0,4708
K	0,0000	0,0126	0,0859	0,1581	0,2033	0,2456	0,2739	0,3657
L	0,0000	0,0067	0,0472	0,1088	0,1696	0,2714	0,3313	0,4387
M	0,0000	0,0056	0,0385	0,1263	0,2011	0,3257	0,3911	0,4559
N	0,0000	0,0133	0,0530	0,1465	0,2867	0,4199	0,4858	0,5952
O	0,0000	0,0180	0,0396	0,1366	0,1985	0,2916	0,3674	0,4791
P	0,0000	0,0110	0,0402	0,1117	0,1889	0,3152	0,3738	0,4765
Q	0,0000	0,0023	0,0232	0,0474	0,0792	0,1359	0,1687	0,2853
R	0,0000	0,0123	0,0336	0,0499	0,0765	0,1410	0,1819	0,2501
S	0,0000	0,0036	0,0225	0,0513	0,0890	0,1691	0,2214	0,3859
T	0,0000	0,0076	0,0587	0,1256	0,1936	0,2796	0,3436	0,4469

TABLEAU 16

Résultats de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 sur les sables.

Source	Temps (jours) - Expansions (%)							
	0	1	3	5	7	11	14	21
A	0,0000	0,0083	0,0190	0,0236	0,0366	0,0419	0,0545	0,0891
B	0,0000	-0,0017	0,0110	0,0126	0,0160	0,0193	0,0253	0,0682
C	0,0000	0,0050	0,0093	0,0179	0,0243	0,0375	0,0631	0,1063
D	0,0000	0,0053	0,0096	0,0170	0,0239	0,0332	0,0465	0,0755
E	0,0000	0,0047	0,0349	0,1004	0,1663	0,2278	0,2597	0,3175
F	0,0000	0,0053	0,0100	0,0086	0,0173	0,0389	0,0499	0,1004
G	0,0000	0,0083	0,0502	0,0661	0,0728	0,0884	0,1007	0,1416
H	0,0000	0,0086	0,0247	0,0741	0,1344	0,1976	0,2227	0,3129
I	0,0000	0,0146	0,0457	0,1117	0,1574	0,2217	0,2592	0,3887
J	0,0000	0,0069	0,0301	0,0811	0,1724	0,2415	0,2680	0,3824
K	0,0000	0,0090	0,0173	0,0282	0,0641	0,0940	0,1431	0,1760
L	0,0000	0,0089	0,0577	0,1691	0,2433	0,3739	0,4171	0,5582
M	0,0000	0,0083	0,0442	0,0901	0,1799	0,2626	0,2916	0,4126
N	0,0000	0,0013	0,0251	0,0998	0,1738	0,2669	0,3132	0,3634
O	0,0000	0,0160	0,0565	0,1513	0,2141	0,3607	0,4076	0,5506
P	0,0000	0,0017	0,0179	0,0488	0,1399	0,2246	0,2595	0,4001
Q	0,0000	0,0036	0,0123	0,0282	0,0508	0,1164	0,1556	0,2661
R	0,0000	0,0070	0,0156	0,0397	0,0824	0,1656	0,2036	0,3172
S	0,0000	0,0086	0,0126	0,0346	0,0629	0,1926	0,2694	0,3895

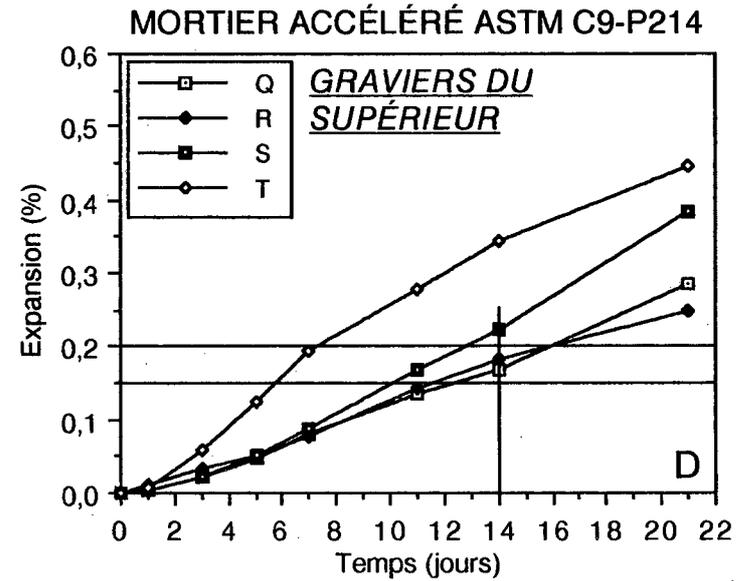
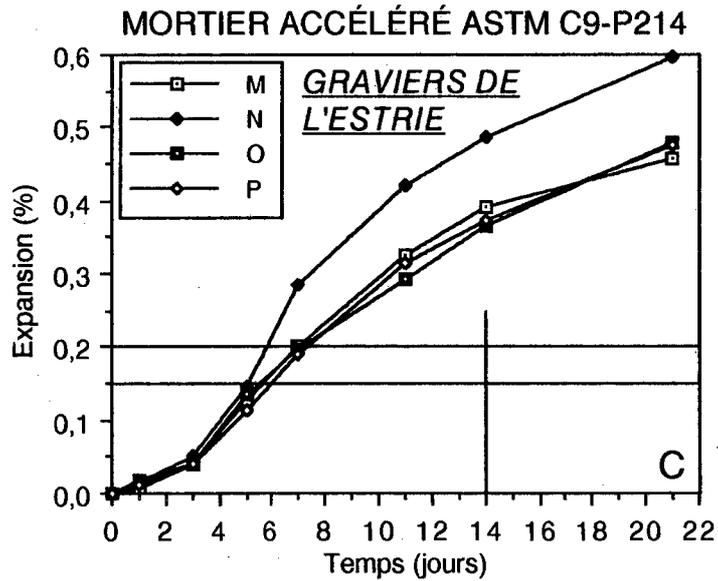
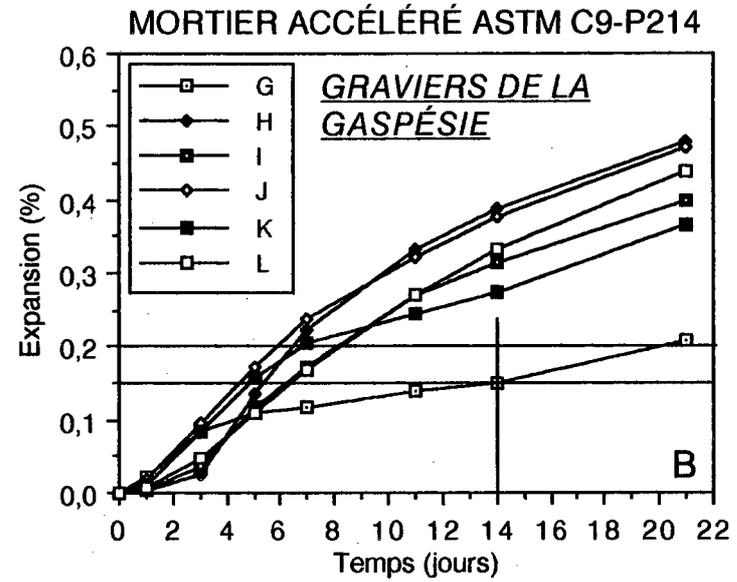
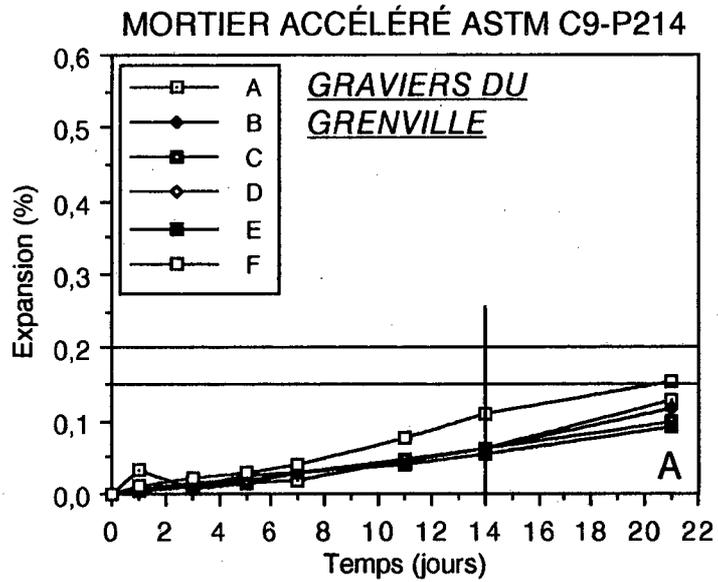


Figure 14. Résultats de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 pour les graviers. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.

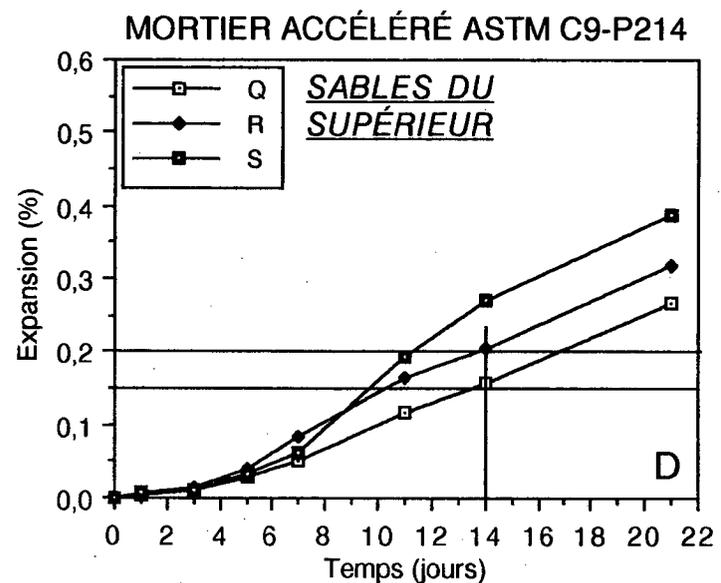
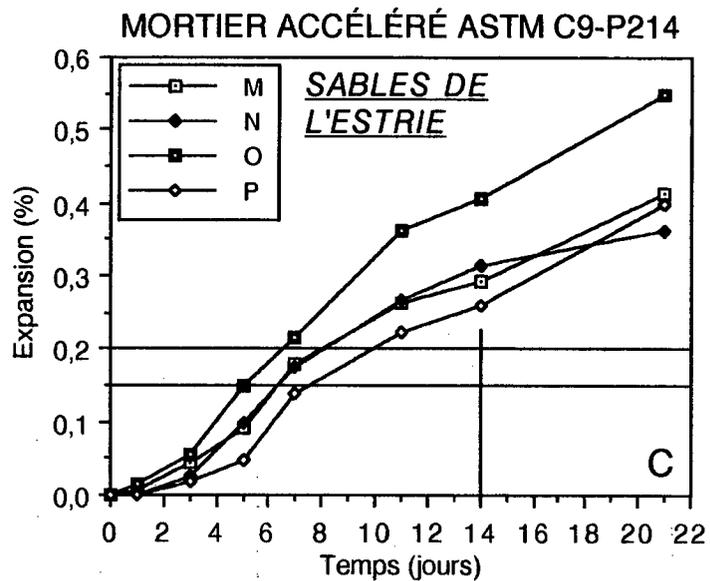
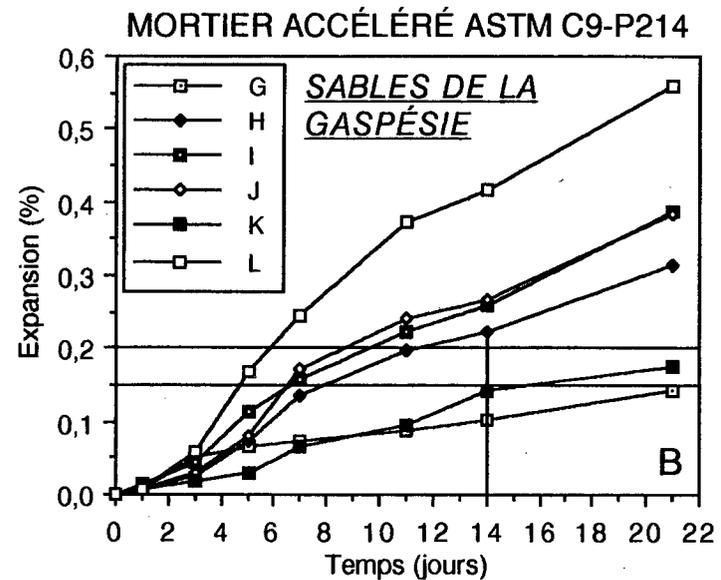
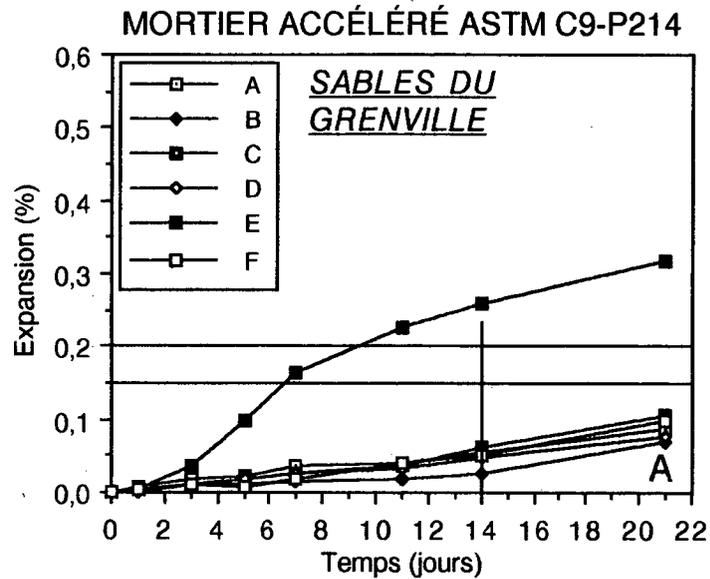


Figure 15. Résultats de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214 pour les sables. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.

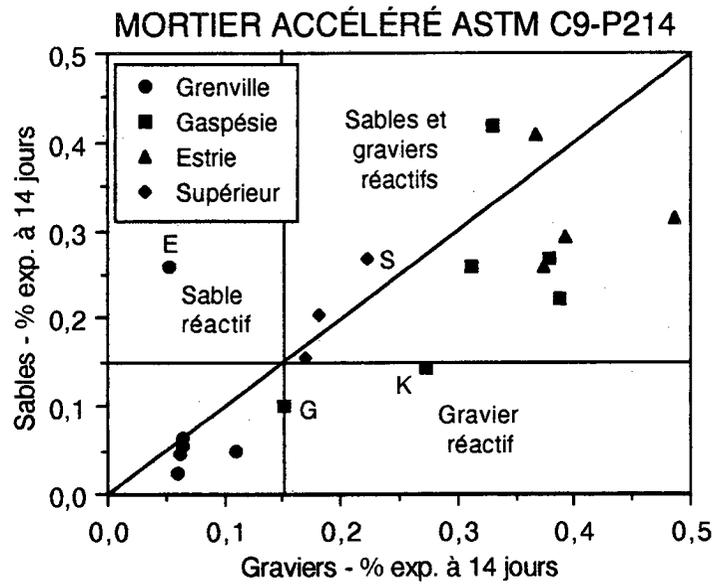


Figure 16. Comparaison entre les résultats obtenus à 14 jours pour les sables et les graviers lors de l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214.

4.8 ESSAI DE LA BARRE DE MORTIER À L'AUTOCLAVE (MÉTHODE LAVAL/MTO)

Les résultats obtenus à cet essai sont présentés au tableau 17 et à la figure 17. Globalement, 47% (9/19) des graviers québécois et 58% (11/19) des sables satisfont à la limite d'expansion de 0,15% à 5 heures suggérée par Fournier et al. (1991), ce qui peut paraître encore bien peu, mais tout de même mieux qu'avec l'essai précédent. Cette fois, tous les échantillons du Grenville et de l'Abitibi satisfont à la limite, sauf le sable E, bien sûr. L'essai n'est toutefois pas tellement moins sévère pour les échantillons de l'Estrie (1 seul échantillon maintenant classé non réactif sur huit échantillons, soit le sable P) et de la Gaspésie (seulement deux sables non réactifs sur un total de 12 échantillons, soit H et K): le sable K était déjà non expansif à l'essai précédent, le sable H, préalablement expansif, ne l'est plus à l'autoclave mais, plus étonnant, le sable G, non expansif à l'essai accéléré sur mortier, a excédé la limite de 0,15% à l'autoclave.

Encore une fois, on peut constater sur la figure 18 que les sables sont généralement moins expansifs (en valeur absolue) que les graviers de même provenance, mais il y a une assez bonne correspondance entre les graviers et les sables réactifs, sauf dans le cas des sources E (sable réactif), H (gravier réactif), K (gravier réactif) et P (gravier réactif). Rappelons-le, les échantillons de sable et de gravier diffèrent en composition dans le cas des sources E (sable plus calcaire) et K (gravier plus calcaire), mais ce n'est pas du tout le cas des deux autres sources H et P.

Somme toute, l'essai à l'autoclave semble donc moins sévère que l'essai accéléré de la barre de mortier, particulièrement dans le cas des échantillons de l'Abitibi. Il demeure toutefois encore trop pour les granulats lithiques des Appalaches. Il s'agit donc, tout comme pour l'essai précédent, d'un essai d'acceptation et non de refus. À ce titre, il est très prometteur, puisqu'il fournit en trois jours seulement des résultats au moins aussi bons que ceux obtenus à l'essai accéléré ASTM C9-P214, et ce non seulement pour les granulats naturels, mais pour tous les types de granulats (Bérubé et al. 1992b).

4.9 ESSAI DU PRISME DE BÉTON ACNOR CAN3-A23.2-14A

Pour les raisons mentionnées à la section 2.4.11, nous avons ici fixé le rapport eau/ciment des mélanges de béton à 0,54 sans égard à l'affaissement obtenu. Les résultats (moyennes de trois prismes) sont présentés au tableau 18 et à la figure 19. Tous les graviers testés respectent la limite d'expansion de 0,04% à un an spécifiée dans la norme ACNOR, même le granulats réactif

TABLEAU 17
 Résultats de l'essai de la barre de mortier à l'autoclave.

Source	Expansion (%) après 5 heures	
	Gravier	Sable
A	0,0559	0,0504
B	0,0451	0,0460
C	0,0524	0,0505
D	0,0643	0,0534
E	0,0386	0,2307
F	0,0514	0,0480
G	0,1965	0,1535
H	0,2133	0,1217
I	0,1911	0,1559
J	0,2443	0,1786
K	0,2248	0,0569
L	0,2079	0,2283
M	0,2073	0,1832
N	0,2959	0,1964
O	0,1970	0,1808
P	0,1983	0,1000
Q	0,1030	0,1291
R	0,0976	0,0886
S	0,1313	0,1213
T	0,1816	-

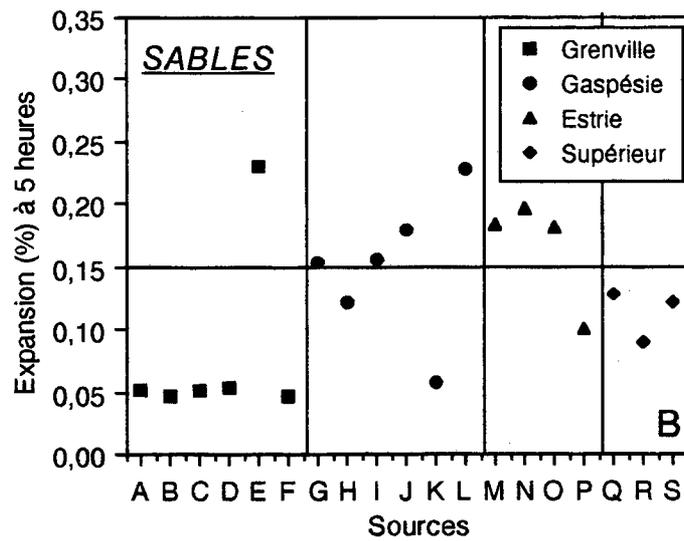
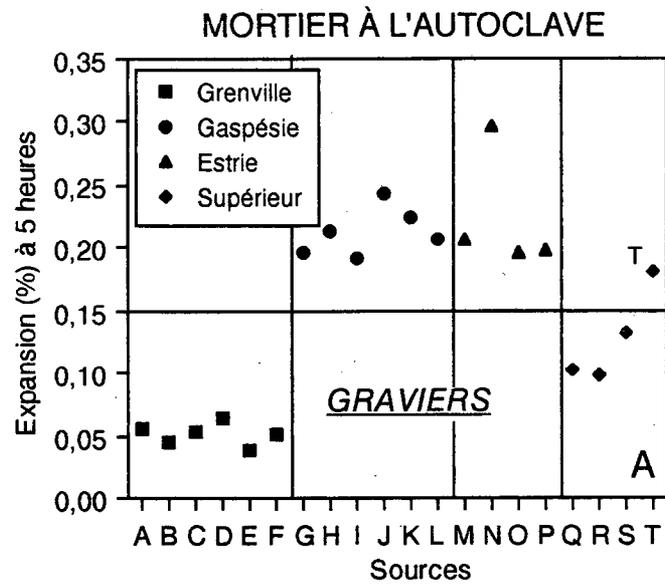


Figure 17. Résultats de l'essai de la barre de mortier à l'autoclave pour les graviers (A) et les sables (B).

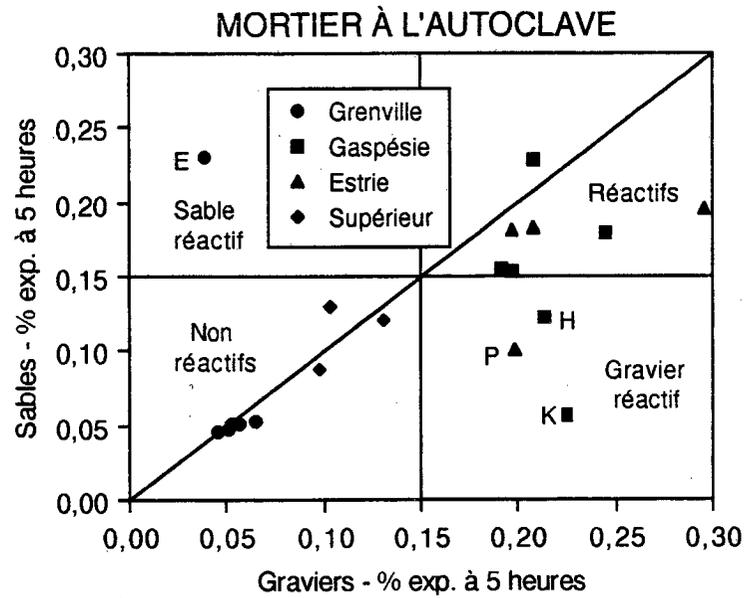


TABLEAU 18
 Résultats de l'essai du prisme de béton ACNOR CAN3-A23.2-14A.

Source	Temps (jours) - Expansions (%)												
	0	7	14	28	56	84	112	168	273	364	450	530	590
A	0,0000	0,0079	0,0068	0,0083	0,0154	0,0121	0,0090	0,0124	0,0079	0,0072	0,0147	0,0132	0,0075
B	0,0000	0,0015	0,0011	0,0053	0,0117	0,0114	0,0053	0,0117	0,0030	0,0023	0,0098	0,0098	0,0034
C	0,0000	-0,0004	0,0011	0,0049	0,0049	0,0049	0,0055	0,0060	0,0011	0,0049	0,0064	0,0083	0,0034
D	0,0000	-0,0026	0,0045	0,0030	0,0139	0,0124	0,0068	0,0105	0,0064	0,0102	0,0177	0,0170	0,0117
E	0,0000	0,0037	0,0053	0,0075	0,0169	0,0079	0,0184	0,0141	0,0098	0,0109	0,0184	0,0165	0,0128
F	0,0000	-0,0045	-0,0004	-0,0015	0,0087	0,0030	0,0102	0,0072	0,0038	0,0075	0,0120	0,0105	0,0049
G	0,0000	-0,0068	-0,0052	-0,0041	0,0064	0,0008	-0,0034	0,0027	-0,0022	-0,0048	0,0079	0,0064	0,0008
H	0,0000	0,0034	0,0049	0,0057	0,0155	0,0057	0,0143	0,0108	0,0072	0,0128	0,0174	0,0143	0,0102
I	0,0000	-0,0056	-0,0034	-0,0033	0,0019	-0,0064	0,0012	-0,0011	-0,0045	-0,0011	0,0012	-0,0003	-0,0033
J	0,0000	-0,0015	0,0015	0,0045	0,0049	0,0026	0,0049	0,0072	0,0023	0,0072	0,0098	0,0124	0,0045
K	0,0000	-0,0075	-0,0008	0,0030	0,0079	-0,0011	0,0068	0,0030	0,0004	0,0049	0,0090	0,0087	0,0045
L	0,0000	-0,0004	0,0011	0,0064	0,0117	0,0038	0,0106	0,0114	0,0216	0,0376	0,0482	0,0512	0,0482
M	0,0000	-0,0064	-0,0064	0,0008	0,0068	0,0034	-0,0022	0,0064	0,0068	0,0150	0,0274	0,0271	0,0252
N	0,0000	0,0031	0,0053	0,0015	0,0125	0,0106	0,0084	0,0114	0,0133	0,0171	0,0239	0,0247	0,0190
O	0,0000	0,0012	0,0012	0,0057	0,0087	0,0027	0,0129	0,0127	0,0125	0,0241	0,0359	0,0359	0,0340
P	0,0000	0,0022	0,0038	-0,0008	0,0131	0,0056	0,0162	0,0199	0,0236	0,0338	0,0379	0,0413	0,0368
Q	0,0000	-0,0144	-0,0098	-0,0083	-0,0045	-0,0079	-0,0049	-0,0019	-0,0095	-0,0057	-0,0038	-0,0030	-0,0068
R	0,0000	0,0008	0,0015	0,0030	0,0065	0,0038	0,0063	0,0087	0,0042	0,0084	0,0099	0,0114	0,0084
S	0,0000	-0,0011	0,0045	0,0060	0,0068	0,0056	0,0066	0,0075	0,0030	0,0056	0,0068	0,0086	0,0041
T	0,0000	-0,0027	-0,0053	-0,0132	-0,0038	-0,0038	-0,0015	0,0022	0,0199	0,0357	0,0557	0,0579	-

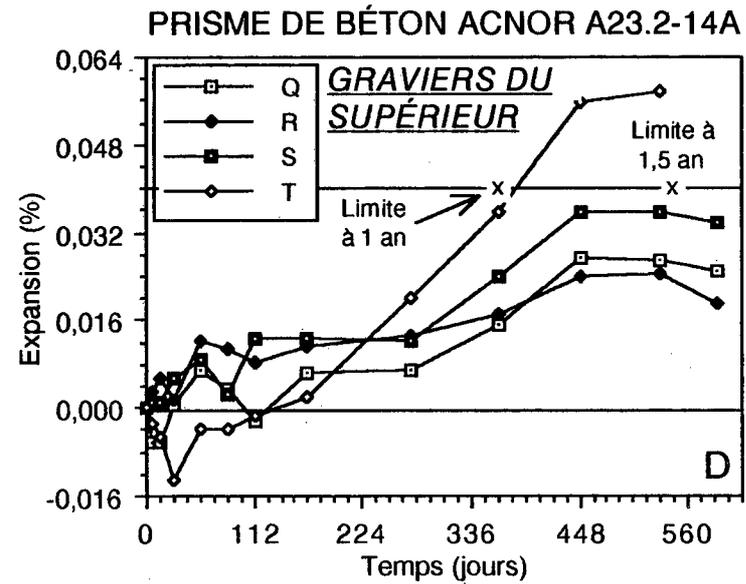
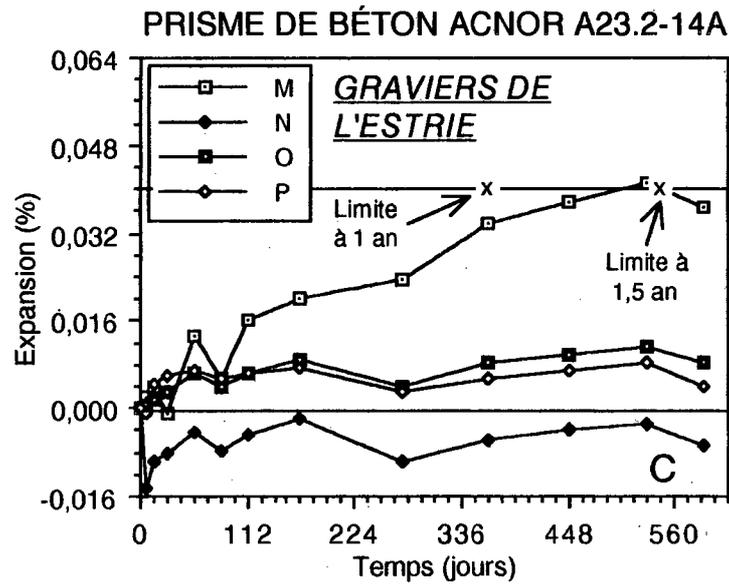
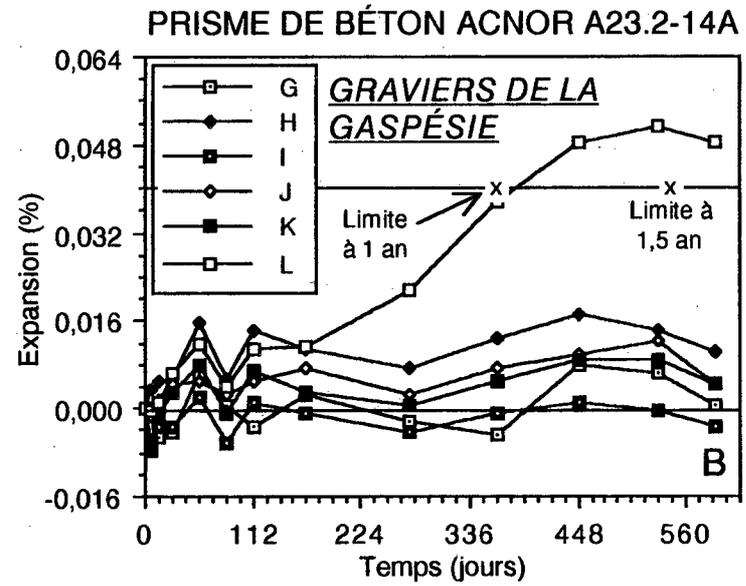
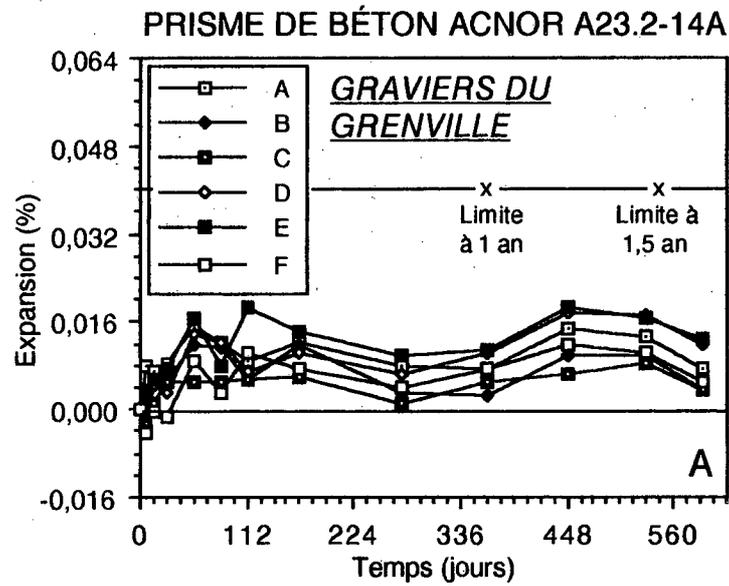


Figure 19. Résultats de l'essai du prisme de béton ACNOR CAN3-A23.2-14A. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.

de référence (T). Bien plus, trois échantillons des Appalaches présentent encore du retrait après un an (G, I et N). En fait, les expansions obtenues à un an sont toutes inférieures à 0,25%, sauf dans trois cas seulement où elles frôlent d'ailleurs la limite d'acceptation de 0,04%; ces trois exceptions sont deux graviers des Appalaches (L: 0,038%; M: 0,034%) et le gravier réactif de référence (T: 0,036%).

En repoussant toutefois à un an et demi la limite d'expansion de 0,04%, ces trois granulats se classent alors réactifs. Dans les Appalaches, un certain nombre de barrages appartenant à Hydro-Québec et fabriqués avec des graviers naturels sont affectés de réactivité alcalis-granulats (Bérard & Roux 1986, Bérubé et al. 1990), soit aux environs de Mitis (plusieurs barrages), en Gaspésie, de Disraéli (un barrage), en Estrie, et du Lac Témiscouata (un barrage), dans le Bas-Saint-Laurent. Or le gravier L, tout en étant pétrographiquement différent des autres graviers de la Gaspésie (le plus siliceux et le moins calcaire), provient de la source étudiée la plus proche de Mitis. Pour sa part, M est la source étudiée la plus proche de Disraéli. Aucune source de gravier naturel n'a malheureusement été échantillonnée dans la région du lac Témiscouata. D'après les autorités d'Hydro-Québec et du MTQ, il ne semble pas y avoir au Québec d'autres structures atteintes de RAG et construites avec des graviers naturels, exception faite d'un autre barrage d'Hydro-Québec situé à Rapides-des-Isles, près de Ville-Marie, en Abitibi (Bérubé et al. 1990). Or, en excluant le témoin de référence (T) et les deux granulats précédents (L, M), les plus fortes expansions observées correspondent aux trois granulats de l'Abitibi! S'agit-il d'une pure coïncidence? Il est donc permis de croire qu'il ne faudrait peut-être pas de fortes modifications à l'essai ACNOR actuel pour le rendre adéquat en présence de graviers naturels, peut-être uniquement une augmentation du contenu en ciment de 310 à quelque 365 kg/m³ (nous y reviendrons).

Par ailleurs, il est fort possible que des expansions supérieures à 0,04% auraient été obtenues à un an si les deux granulats d'une même source (sable + gravier) avaient été testés ensemble, comme c'est normalement le cas dans la pratique. Par exemple, dans le cas de granulats semblables à ceux utilisés dans le barrage de Mactaquac, au Nouveau-Brunswick, qui est atteint de RAG, les expansions à un an ont doublé en procédant de cette manière, passant de 0,034% (gros granulat semblable à celui utilisé dans le barrage + sable non réactif) à 0,066% (gros granulat + sable semblables à ceux utilisés dans le barrage) (Thompson 1990). En définitive, il se pourrait donc que l'essai ACNOR actuel soit somme toute satisfaisant, l'erreur ayant été jusqu'ici d'avoir testé seul le gros granulat, c'est-à-dire en présence d'un sable non réactif. Dans le cas de l'évaluation d'une source particulière de granulats à béton ou encore

d'une usine de béton, il est donc fortement recommandé de tester ensemble le gravier et le sable utilisés dans la fabrication du béton.

Rappelons que des résultats semblables (c'est-à-dire des expansions $<0,04\%$ à un an à l'essai ACNOR) ont aussi été obtenus pour des graviers des Appalaches des Maritimes (DeMerchant & Soles 1990). On suggérait alors d'évaluer ce type de granulats par rapport à un gravier réactif de référence, ce que nous avons fait dans cette étude. Comme nous venons de le mentionner, deux échantillons québécois ont présenté des expansions très voisines de celle de notre gravier de référence, alors que tous les autres ont montré des expansions nettement plus faibles. On sait que le gravier de référence est réactif, mais où peut-on vraiment situer la limite entre les granulats réactifs et ceux qui ne le sont pas?

Une autre étude effectuée cette fois au ministère des Transports de l'Ontario sur des granulats à expansion tardive, dont font partie le gravier de référence et les graviers réactifs des Maritimes, montre également qu'aucun d'entre eux ne dépasse la limite de $0,04\%$ à un an lorsque la quantité d'alcalis du mélange est inférieure à 5 kg/m^3 (Rogers 1990), alors que la norme ACNOR spécifie un contenu de $3,9 \text{ kg/m}^3$. La solution présentement proposée par l'ACNOR (CSA 1992) est d'augmenter la quantité de ciment dans le mélange à 420 kg/m^3 (au lieu de 310), tout en augmentant la teneur en alcalis du ciment utilisé à $1,25\% \text{ Na}_2\text{O}$ éq., ce qui correspond à un contenu total en alcalis de $5,25 \text{ kg/m}^3$. Grattan-Bellew (1990) indique que les résultats obtenus avec un dosage en ciment de 410 kg/m^3 offrent en effet une meilleure corrélation avec la performance sur le terrain des granulats qu'il a testés. Le nouvel essai proposé par l'ACNOR s'apparente grandement à celui expérimenté dans le cadre de cette étude et désigné ci-après par l'expression «essai modifié ACNOR».

4.10 ESSAI MODIFIÉ DU PRISME DE BÉTON ACNOR

Cet essai fut effectué à la suite des résultats plutôt décevants obtenus après six mois à l'essai normalisé du prisme de béton ACNOR A23.2-14A (avec 310 kg/m^3 de ciment). Nous avons ici utilisé 410 kg/m^3 de ciment tout en augmentant à $1,25\% \text{ Na}_2\text{O}$ éq. la teneur en alcalis du ciment. Nous avons toutefois utilisé le même rapport eau/ciment que précédemment ($0,54$), ce qui a donné lieu à des affaissements très élevés. Seulement la moitié des échantillons de graviers à l'étude ont été testés, et les résultats obtenus sont présentés au tableau 19 et à la figure 20. Après un an, les expansions enregistrées sont systématiquement plus importantes que celles obtenues avec 310 kg/m^3 et auraient peut-être été encore plus élevées si on avait

TABLEAU 19
Résultats de l'essai modifié du prisme de béton ACNOR.

Source	Temps (jours) - Expansions (%)									
	0	7	14	28	56	84	112	168	273	364
B	0,0000	-0,0001	0,0018	0,0056	0,0074	0,0063	0,0108	0,0142	0,0180	0,0112
E	0,0000	0,0049	0,0038	0,0060	0,0098	0,0091	0,0132	0,0166	0,0279	0,0336
F	0,0000	0,0064	0,0076	0,0121	0,0144	0,0129	0,0163	0,0197	0,0261	0,0200
J	0,0000	0,0015	-0,0004	0,0019	0,0038	0,0049	0,0090	0,0196	0,0369	0,0504
K	0,0000	-0,0080	0,0007	0,0018	0,0124	0,0128	0,0139	0,0169	0,0173	0,0132
L	0,0000	0,0000	0,0045	0,0068	0,0121	0,0124	0,0170	0,0256	0,0399	0,0436
M	0,0000	-0,0068	-0,0057	-0,0030	0,0061	0,0083	0,0121	0,0208	0,0386	0,0435
N	0,0000	-0,0019	-0,0004	0,0038	0,0057	0,0106	0,0136	0,0290	0,0705	0,0856
O	0,0000	0,0019	0,0030	0,0027	0,0110	0,0099	0,0110	0,0156	0,0197	0,0197
R	0,0000	0,0015	0,0008	0,0049	0,0064	0,0064	0,0109	0,0223	0,0514	0,0688

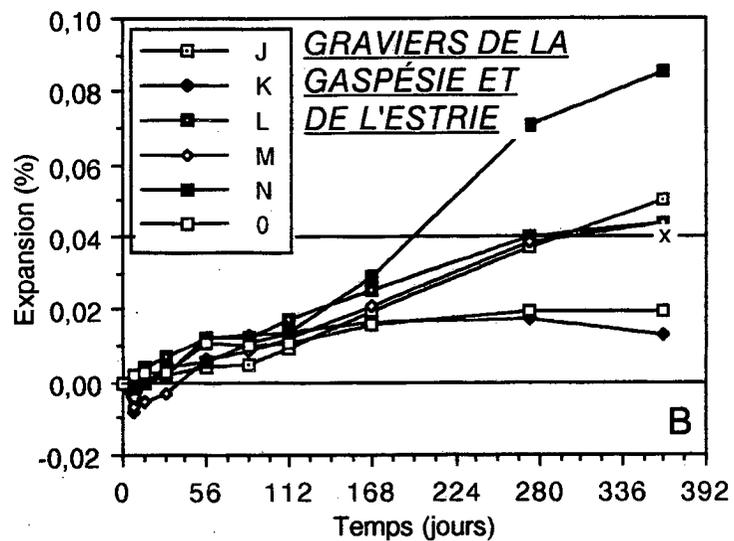
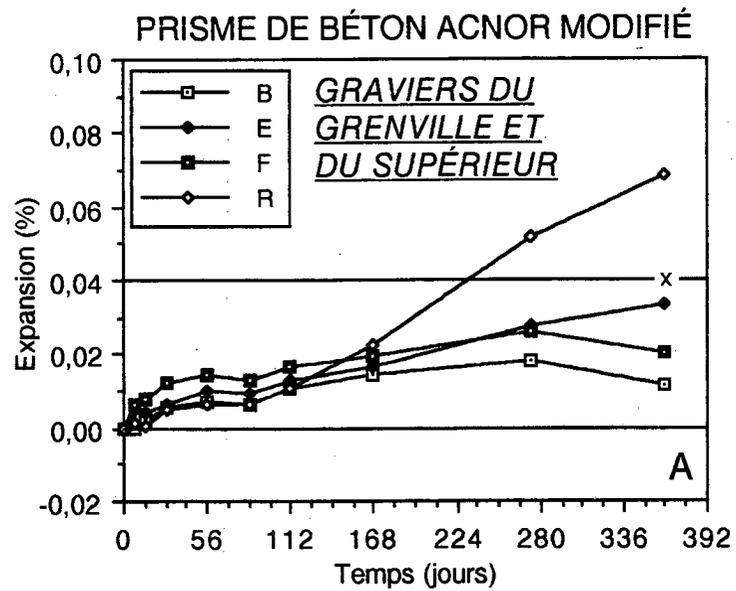


Figure 20. Résultats de l'essai modifié du prisme de béton ACNOR. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.

utilisé un plus faible rapport eau/ciment, de manière à obtenir des affaissements plus normaux (Bérubé & Fournier 1992).

Les trois graviers testés du Grenville satisfont à la limite d'expansion suggérée de 0,04% à un an, contrairement au seul échantillon testé de l'Abitibi (R) et à quatre des six échantillons testés des Appalaches (J, L, M, N). Au total, 50% (5/10) des graviers soumis à l'essai modifié du prisme de béton ont échoué. Ces résultats peuvent paraître de prime abord plus réalistes que ceux obtenus avec l'essai normalisé actuel, mais ils sont sans doute encore trop sévères pour plusieurs des granulats testés. Par exemple, l'expansion à un an du gravier granitique du Grenville E (0,034%) frôle la limite de 0,04%, ce qui est plutôt préoccupant compte tenu de leur excellente performance à l'essai accéléré de la barre de mortier ASTM C9-P214, pour sa part très sévère.

Si l'essai ACNOR actuel peut paraître trop peu sévère, l'essai modifié risque donc pour sa part de l'être trop, et ce particulièrement si le sable et le gravier d'une même source sont testés ensemble. Une limite moins sévère de 0,04% à huit mois pourrait paraître à cet égard plus réaliste. Une telle limite est d'ailleurs proposée dans l'essai français du prisme de béton AFNOR P18-587, lequel essai implique lui-aussi 410 kg/m³ de ciment et une augmentation de la teneur en alcalis du ciment à 1,25% (Na₂O éq.). Sur cette base, deux granulats seulement sur les dix testés se classeraient réactifs (N et R), ce qui nous apparaît malgré tout encore trop sévère dans le cas du gravier de l'Abitibi (R).

4.11 ESSAI ACCÉLÉRÉ DU PRISME DE BÉTON (MÉTHODE «SUD-AFRICAINE»)

Les échantillons ici testés correspondent au même mélange de béton que celui de l'essai ACNOR A23.2-14A. Ils sont immergés dans une solution de NaOH à 80°C. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 20 et à la figure 21. En utilisant la limite proposée de 0,04% à 24 jours (Ouellet 1988, Blanchette 1989, Bérubé & Fournier 1990, 1992), trois des six échantillons du Grenville et trois des quatre graviers du Supérieur, dont le gravier réactif de référence, sont classés réactifs, tout comme (seulement) trois des dix échantillons des Appalaches. Nous nous serions plutôt attendus au contraire. En effet, il est plutôt inquiétant d'obtenir des résultats si mauvais pour les échantillons de composition granitique du Grenville et du Supérieur, et nettement meilleurs pour les échantillons lithiques des Appalaches, compte tenu des résultats obtenus lors des essais accélérés sur mortier ASTM C9-P214 et à l'autoclave, très sévères, qui ne classent aucun gravier granitique comme réactif. De plus, le gravier réactif

TABLEAU 20
Résultats de l'essai accéléré du prisme de béton.

Source	Temps (jours) - Expansions (%)										
	0	1	3	5	7	11	14	17	21	28	35
A	0,0000	0,0046	0,0077	0,0014	-0,0033	0,0118	0,0135	0,0183	0,0231	0,0388	0,0540
B	0,0000	0,0049	0,0100	0,0089	0,0074	0,0097	0,0251	0,0277	0,0302	0,0365	0,0632
C	0,0000	0,0011	-0,0028	0,0045	0,0011	0,0118	0,0157	0,0298	0,0337	0,0534	0,0725
D	0,0000	0,0015	0,0057	0,0026	-0,0034	0,0028	0,0085	0,0168	0,0250	0,0641	0,0874
E	0,0000	0,0023	0,0006	0,0068	0,0040	0,0068	0,0164	0,0300	0,0390	0,0582	0,0803
F	0,0000	0,0000	0,0017	0,0000	0,0051	0,0068	0,0153	0,0210	0,0249	0,0459	0,0606
G	0,0000	-0,0020	0,0032	0,0058	0,0012	0,0223	0,0234	0,0280	0,0325	0,0394	0,0673
H	0,0000	-0,0051	-0,0006	-0,0023	0,0045	0,0147	0,0198	0,0277	0,0288	0,0497	0,0678
I	0,0000	0,0023	-0,0011	0,0119	0,0136	0,0260	0,0356	0,0350	0,0424	0,0610	0,0864
J	0,0000	0,0006	0,0023	0,0102	0,0079	0,0182	0,0193	0,0341	0,0375	0,0511	0,0630
K	0,0000	0,0034	0,0091	0,0057	0,0113	0,0147	0,0159	0,0204	0,0232	0,0317	0,0464
L	0,0000	0,0017	-0,0108	0,0023	0,0057	0,0170	0,0210	0,0272	0,0300	0,0414	0,0584
M	0,0000	-0,0073	-0,0006	0,0079	0,0085	0,0170	0,0176	0,0289	0,0272	0,0373	0,0475
N	0,0000	0,0051	0,0023	0,0102	0,0102	0,0204	0,0288	0,0362	0,0385	0,0498	0,0588
O	0,0000	-0,0005	-0,0005	0,0079	0,0074	0,0107	0,0152	0,0288	0,0243	0,0322	0,0429
P	0,0000	-0,0005	0,0096	0,0062	0,0119	0,0136	0,0186	0,0181	0,0288	0,0345	0,0441
Q	0,0000	0,0046	0,0082	0,0033	-0,0006	0,0288	0,0305	0,0379	0,0452	0,0571	0,0763
R	0,0000	0,0063	0,0162	0,0187	0,0175	0,0142	0,0356	0,0447	0,0537	0,0577	0,0724
S	0,0000	-0,0068	-0,0011	0,0091	0,0068	0,0102	0,0147	0,0278	0,0278	0,0442	0,0595
T	0,0000	0,0045	-0,0045	0,0062	0,0045	0,0175	0,0249	0,0351	0,0351	0,0492	0,0645

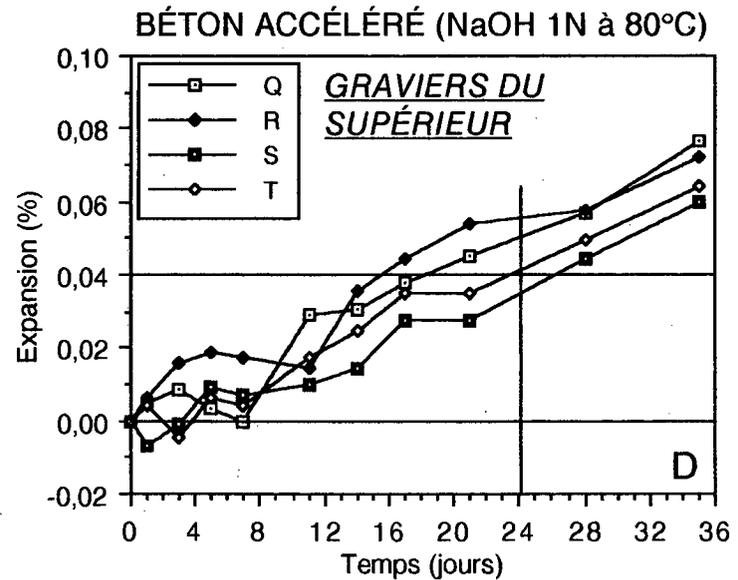
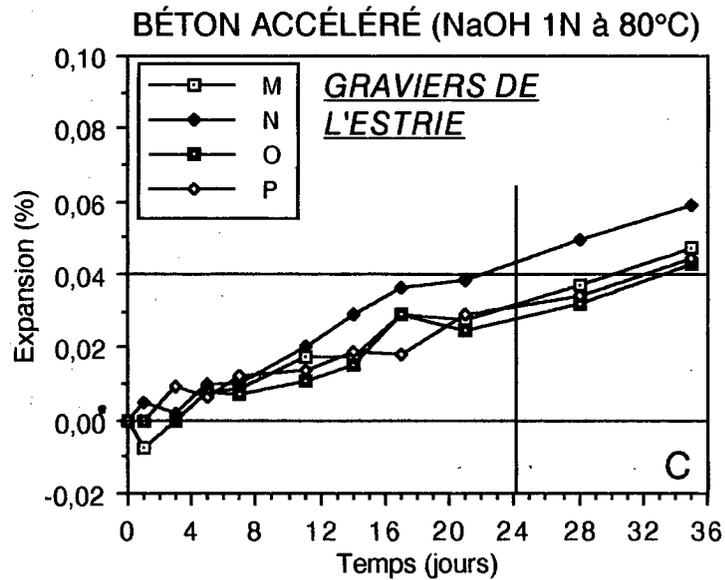
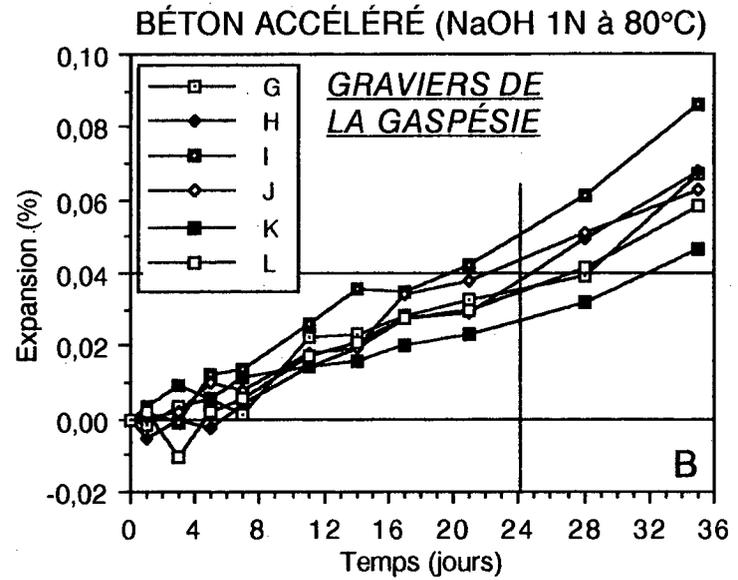
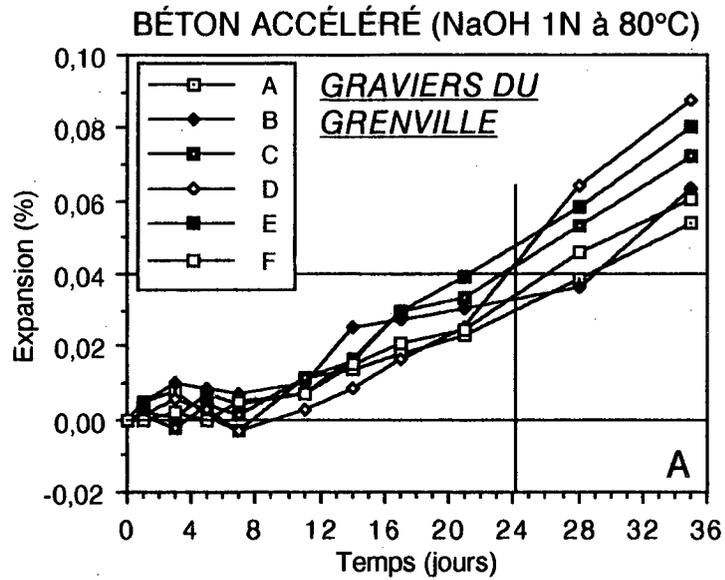


Figure 21. Résultats de l'essai accéléré du prisme de béton. A: Grenville. B: Gaspésie. C: Estrie. D: Supérieur.

de référence (T) est à peine détecté par l'essai accéléré sur béton (expansion interpolée très marginale de 0,041% à 24 jours).

Les résultats de cet essai doivent donc être considérés avec une très grande réserve. De plus, les faibles écarts d'expansion observés entre les différents granulats rendent très audacieuse l'interprétation des résultats. En effet, il n'est pas possible de tracer une limite permettant de distinguer sans aucune ambiguïté les échantillons réactifs de ceux qui ne le sont pas. Changer la durée de l'essai ou la valeur-limite d'expansion ne changerait d'ailleurs rien au problème. En définitive, on ne devrait pas utiliser cet essai, que ce soit comme norme d'acceptation ou de refus.

4.12 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES ESSAIS DE RÉACTIVITÉ ALCALINE

Les résultats obtenus pour l'ensemble des essais et des matériaux testés sont résumés aux tableaux 21 (graviers) et 22 (sables). Pour chaque essai effectué, les granulats sont classés réactifs (cote R) ou non réactifs (cote NR) sur la base des critères utilisés dans chaque cas. Pour les essais où trois cotes différentes ont été considérées, par exemple dans les cas de l'examen pétrographique et de l'essai de production de gel (cotes 1 à 3), la cote intermédiaire 2, correspondant à un potentiel moyen de réactivité (examen pétrographique) ou à un échantillon marginalement réactif (essai de production de gel), a été classée sous la cote R (réactif). Somme toute, les résultats obtenus remettent en question l'efficacité et la validité de certains essais proposés aux fins d'évaluation du potentiel de RAG des granulats à béton, en général, et des granulats naturels, en particulier.

Bien que qualitatifs, les résultats obtenus lors de l'examen pétrographique donnent déjà une certaine indication du potentiel de réactivité d'un granulat. En temps normal, cet examen permet souvent d'économiser temps et argent, car il permet de sélectionner plus judicieusement les essais subséquents. Toutefois, en raison de la complexité pétrographique habituelle des granulats naturels, un examen pétrographique peut difficilement servir de norme d'acceptation ou de refus de ces matériaux.

Il en est de même de l'essai de production de gel («gel pat test») qui, malgré les résultats qualitatifs intéressants qu'il peut fournir, en particulier sur les faciès pétrographiques réactifs dans un mélange (gravier) donné, est plutôt sévère pour les graviers naturels (74% de refus).

TABLEAU 21

Sommaire des résultats obtenus pour les graviers.

Source	Pétro. optique	Gel pat test	Méth. chim. C289	Méth. chim. C289 mod.	C289 mod. Sc<100 mmoles/l	Mortier C227 <0,05% 6 m	Béton ACNOR <0,04% 1 an	Béton ACNOR <0,04% 1,5 an	Béton mod. <0,04% 1 an	Béton accélééré <0,04% 24 jrs	Mortier accélééré <0,15% 14 jrs	Mortier autocl. <0,15% 5 hrs	Cote globale
<u>Rive nord du Saint-Laurent (Grenville)</u>													
A	NR	NR	NR	R	NR	NR	NR	NR	-	NR	NR	NR	NR
B	NR	NR	NR	R	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
C	NR	NR	NR	R	NR	NR	NR	NR	-	R	NR	NR	NR
D	NR	R	NR	R	NR	NR	NR	NR	-	R	NR	NR	NR
E	NR	NR	NR	R	NR	NR	NR	NR	NR	R	NR	NR	NR
F	NR	NR	NR	R	R	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
<u>Gaspésie (Appalaches)</u>													
G	R	R	R	R	R	NR	NR	NR	-	NR	R	R	NR?
H	R	R	NR	R	R	NR	NR	NR	-	NR	R	R	NR?
I	R	R	NR	R	R	NR	NR	NR	-	R	R	R	NR?
J	R	R	NR	R	R	R	NR	NR	R	R	R	R	R
K	R	R	R	R	R	R?	NR	NR	NR	NR	R	R	NR?
L	R	R	NR	R	NR	NR	NR	R	R	NR	R	R	R
<u>Estrie (Appalaches)</u>													
M	R	R	NR	R	R	R	NR	R	R	NR	R	R	R
N	R	R	R	R	R	R	NR	NR	R	R	R	R	R
O	R	R	NR	R	NR	R?	NR	NR	NR	NR	R	R	NR?
P	R	R	NR	R	R	R	NR	NR	-	NR	R	R	R
<u>Abitibi (Supérieur)</u>													
Q	R	R	NR	R	NR	NR	NR	NR	-	R	R	NR	NR
R	R	R	NR	R	NR	NR	NR	NR	R	R	R	NR	NR
S	R	R	NR	R	NR	NR	NR	NR	-	NR	R	NR	NR
<u>Témoin ontarien (Supérieur)</u>													
T	R	R	NR	R	NR	R	NR	R	-	R	R	R	R
%R*	68%	74%	16%	100%	47%	32%	0%	11%	50%	42%	68%	53%	26%

* Excluant le témoin T. R: réactif ou potentiellement réactif. NR: non réactif. ?: résultat douteux ou cote attribuée avec réserve. -: essai non effectué.

TABLEAU 22

Sommaire des résultats obtenus pour les sables.

Source	Péto. optique	Gel pat test	Méth. chim. C289	Méth. chim. C289 mod.	C289 mod. Sc<100 mmoles/l	Mortier C227 <0,05% 6 m	Béton ACNOR <0,04% 1 an	Béton ACNOR <0,04% 1,5 an	Béton mod. <0,04% 1 an	Béton accélééré <0,04% 24 jrs	Mortier accélééré <0,15% 14 jrs	Mortier autocl. <0,15% 5 hrs	Cote globale
<u>Rive nord du Saint-Laurent (Grenville)</u>													
A	-	-	NR	R	NR	NR	-	-	-	-	NR	NR	NR
B	-	-	NR	R	NR	NR	-	-	-	-	NR	NR	NR
C	-	-	NR	R	NR	NR	-	-	-	-	NR	NR	NR
D	-	-	NR	R	NR	NR	-	-	-	-	NR	NR	NR
E	-	-	NR	R	NR	R	-	-	-	-	R	R	R
F	-	-	NR	R	NR	NR	-	-	-	-	NR	NR	NR
<u>Gaspésie (Appalaches)</u>													
G	-	-	R	R	R	NR	-	-	-	-	NR	R?	NR?
H	-	-	NR	R	R	NR	-	-	-	-	R	NR	NR
I	-	-	NR	R	R	R	-	-	-	-	R	R	R
J	-	-	NR	R	R	R	-	-	-	-	R	R	R
K	-	-	NR	R	R	NR	-	-	-	-	NR	NR	NR
L	-	-	NR	R	R	R	-	-	-	-	R	R	R
<u>Estrie (Appalaches)</u>													
M	-	-	NR	R	NR	R	-	-	-	-	R	R	R
N	-	-	NR	R	NR	R	-	-	-	-	R	R	R
O	-	-	NR	R	NR	R	-	-	-	-	R	R	R
P	-	-	NR	R	NR	R	-	-	-	-	R	NR?	R?
<u>Abitibi (Supérieur)</u>													
Q	-	-	NR	R	NR	NR	-	-	-	-	R	NR	NR
R	-	-	NR	R	NR	NR	-	-	-	-	R	NR	NR
S	-	-	NR	R	NR	NR	-	-	-	-	R	NR	NR
%R	-	-	5%	100%	32%	37%	-	-	-	-	63%	42%	42%

R: réactif ou potentiellement réactif. NR: non réactif. ?: résultat douteux ou cote attribuée avec réserve. -: essai non effectué.

L'essai de la méthode chimique ASTM C289 est pour sa part très permissif pour les granulats naturels, acceptant 84% des graviers et 95% des sables québécois testés, et ce principalement en raison de l'interférence de la part des carbonates présents en plus ou moins grandes quantités dans la plupart de ces matériaux. Il n'est donc pas du tout recommandé.

Il en est de même de l'essai modifié de la méthode chimique (essai ASTM C289 pratiqué sur les résidus insolubles des granulats), cette fois beaucoup trop sévère pour les sables et graviers du Québec, puisqu'il les classe tous comme réactifs. L'utilisation d'une valeur de S_c (silice dissoute) de 100 mmoles/litre comme limite d'acceptation des granulats semble améliorer les résultats, entraînant le refus de 47% des graviers et de 32% des sables québécois. Toutefois, l'utilisation d'une telle limite n'en demeure pas moins risquée, puisqu'elle laisse par exemple filer le gravier réactif de référence (T), alors qu'elle intercepte un gravier du Grenville (F), pourtant performant à tous les essais sur mortier et sur béton, même les plus sévères.

L'essai du prisme de béton ACNOR A23.2-14A présentement en vigueur (310 kg/m³ de ciment, limite de 0,04% à un an) s'est montré généreux pour tous les graviers testés, même le gravier réactif de référence (T). Il est donc évident que les conditions expérimentales et/ou la limite d'expansion doivent être modifiées. Toutefois, l'essai se rapproche un peu plus de la réalité si la limite de 0,04% est reportée à un an et demi. En effet, dans un tel cas, trois graviers testés sont classés expansifs, dont le gravier réactif de référence T et deux autres dont les sources ne sont d'ailleurs pas très éloignées de barrages affectés de réactivité alcaline et appartenant à Hydro-Québec. L'essai n'en demeure pas moins encore un peu trop permissif à notre avis (?).

Notons par ailleurs qu'un plus fort dosage en ciment de l'ordre de 410 kg/m³, comme dans l'essai modifié du prisme de béton, fournit des résultats que nous estimons cette fois trop sévères (50% des dix granulats testés sont expansifs), et que ce serait sans doute encore pire si on avait testé ensemble le sable et le gravier d'une même source, et si on avait utilisé un rapport eau/ciment <0,54 (rapport utilisé), en fait plus compatible avec un tel dosage en ciment. Mentionnons que l'essai récemment proposé en remplacement de la norme ACNOR actuelle stipule d'ailleurs un dosage en ciment de 420 kg/m³, un rapport eau/ciment de 0,42 à 0,45, et toujours une limite d'acceptation de 0,04% à un an (CSA 1992). On peut d'ores et déjà prévoir que de telles modifications seront catastrophiques pour les granulats naturels du Québec. Nous recommandons plutôt un dosage intermédiaire de 365 kg/m³, assorti d'une limite de 0,04% à un an. Un tel essai modifié est recommandé aussi bien pour tester un gravier (en présence d'un sable non réactif) qu'un sable (en présence d'un gros granulat non réactif) ou un mélange

sable/gravier utilisé dans la pratique. Cette dernière option est fortement recommandée dans le cas de sources fournissant à la fois les deux types de granulats.

L'essai accéléré du prisme de béton (immersion dans NaOH 1N à 80°C) peut paraître attrayant dans le cas du béton en service (carottes de forage), mais s'est montré beaucoup trop sévère pour les graviers testés, en particulier pour ceux de composition granitique. Il n'est donc pas du tout recommandé.

Compte tenu d'une limite de 0,05% à six mois, l'essai de la barre de mortier ASTM C227 refuse quant à lui 32% des graviers et 37% des sables québécois étudiés, et pourrait donc sembler de prime abord plus réaliste (c'est-à-dire ni trop permissif ni trop sévère). Toutefois, il détecte à peine le gravier réactif de référence (T) et laisse passer un autre gravier (L) par ailleurs expansif à l'essai sur béton ACNOR (>0.04% à 1,5 an), essai pourtant considéré comme trop peu sévère. D'autre part, il semble cette fois plutôt sévère pour deux graviers des Appalaches (K et O) qui ont eu la "chance" d'avoir été soumis à l'essai modifié sur béton, considéré quant à lui comme trop sévère, et qui l'ont passé avec succès (i.e. expansion >0.04% à un an). Il se pourrait également qu'un autre gravier ayant échoué l'essai C227, mais non testé à l'essai modifié sur béton (P), ait lui aussi été trop sévèrement jugé. En l'absence de plus d'information, un gravier qui aura passé l'essai ACNOR (pas assez sévère), mais qui aura échoué ou qui n'aura pas été testé à l'essai ACNOR modifié (trop sévère), sera considéré comme potentiellement réactif s'il a généré une expansion >0,05% à six mois à l'essai ASTM C227. L'essai ASTM sera également utilisé dans l'évaluation des sables, qui n'ont pas été testés sur béton. Malgré le peu de fiabilité qu'on leur reconnaît maintenant (voir section 2.4.8), on a donc considéré les résultats de l'essai ASTM C227 dans l'évaluation des granulats étudiés. L'essai n'en est pas pour autant recommandé ci-après. Il ne fait d'ailleurs pas le poids face à un essai sur béton ACNOR, plus réaliste et pas tellement plus long. Mentionnons que ce dernier essai est également recommandé pour tester un sable.

L'essai accéléré sur mortier ASTM C9-P214 (limite de 0,15% à 14 jours: refus de 68% des graviers et de 63% des sables québécois) et l'essai sur mortier à l'autoclave (limite de 0,15% à 5 heures: refus de 53% des graviers et de 42% des sables québécois) sont sans contredit les meilleurs essais accélérés qui puissent être utilisés comme norme d'acceptation d'un granulat naturel, mais pas comme norme de refus, car ils sont très sévères pour ce type de granulat, surtout l'essai ASTM.

4.13 ÉVALUATION GLOBALE DU POTENTIEL DE RAG DES GRANULATS ÉTUDIÉS

On retient de ce qui précède que cinq essais seront utilisés afin d'évaluer le potentiel de réactivité alcaline des granulats testés: (1) l'essai accéléré sur mortier ASTM C9-P214, comme norme d'acceptation, parce que très sévère; (2) l'essai sur mortier à l'autoclave, également comme norme d'acceptation, parce que trop sévère; (3) l'essai du prisme de béton ACNOR (limite de 0,04% à un an et demi), comme norme de refus, parce que jugé trop peu sévère; (4) l'essai modifié du prisme de béton ACNOR, comme norme d'acceptation, parce que jugé trop sévère, et (5) l'essai sur mortier ASTM C227, comme norme de refus, parce que souvent trop peu sévère, et comme norme d'acceptation avec réserve lorsque les essais précédents n'auront pas été concluants. Évidemment, dans le cas des sables, les essais sur béton n'ont pas été effectués et nous ne disposons dans leur cas que des résultats des trois essais sur mortier.

4.13.1 Évaluation des graviers

Sur la base des cinq essais précédents, les graviers ont été classés en trois groupes: non réactifs (cote NR), non réactifs avec réserve (cote NR?) et réactifs (cote R) (tableau 21 et figure 22A).

- Graviers non réactifs (cote NR) (neuf échantillons): ce groupe comprend tous les graviers du Grenville (6) et du Supérieur québécois (3). Les premiers passent avec succès les cinq essais précédents, incluant l'essai ACNOR modifié (lorsqu'il a été effectué). Les graviers du Supérieur québécois n'échouent que l'essai accéléré sur mortier, très sévère, à une exception près: le gravier R, le seul testé à l'essai ACNOR modifié, échoue aussi cet essai, toutefois également considéré comme trop sévère. On constate par la même occasion que l'essai à l'autoclave est moins sévère que l'essai accéléré sur mortier.
- Graviers non réactifs avec réserve (cote NR?) (cinq échantillons): ce groupe comprend quatre graviers lithiques de la Gaspésie (G, H, I, K) et un autre de l'Estrie (O). Tous ces échantillons échouent les deux essais accélérés sur mortier mais satisfont à l'essai sur béton ACNOR (expansion <0,04% à un an et demi), ce qui n'est cependant pas très révélateur. Les trois premiers graviers n'ont pas été testés à l'essai ACNOR modifié mais passent toutefois l'essai sur mortier ASTM C227. C'est parce que ce dernier essai est souvent trop peu sévère que ces échantillons ont été classés non réactifs, mais avec réserve. Quant aux deux autres graviers (K et O), ils ont satisfait à l'essai ACNOR modifié, considéré comme trop sévère, mais, fait plutôt surprenant, ont quand même échoué l'essai sur mortier ASTM C227, souvent trop peu sévère. L'essai sur béton étant cependant à notre avis plus convaincant,

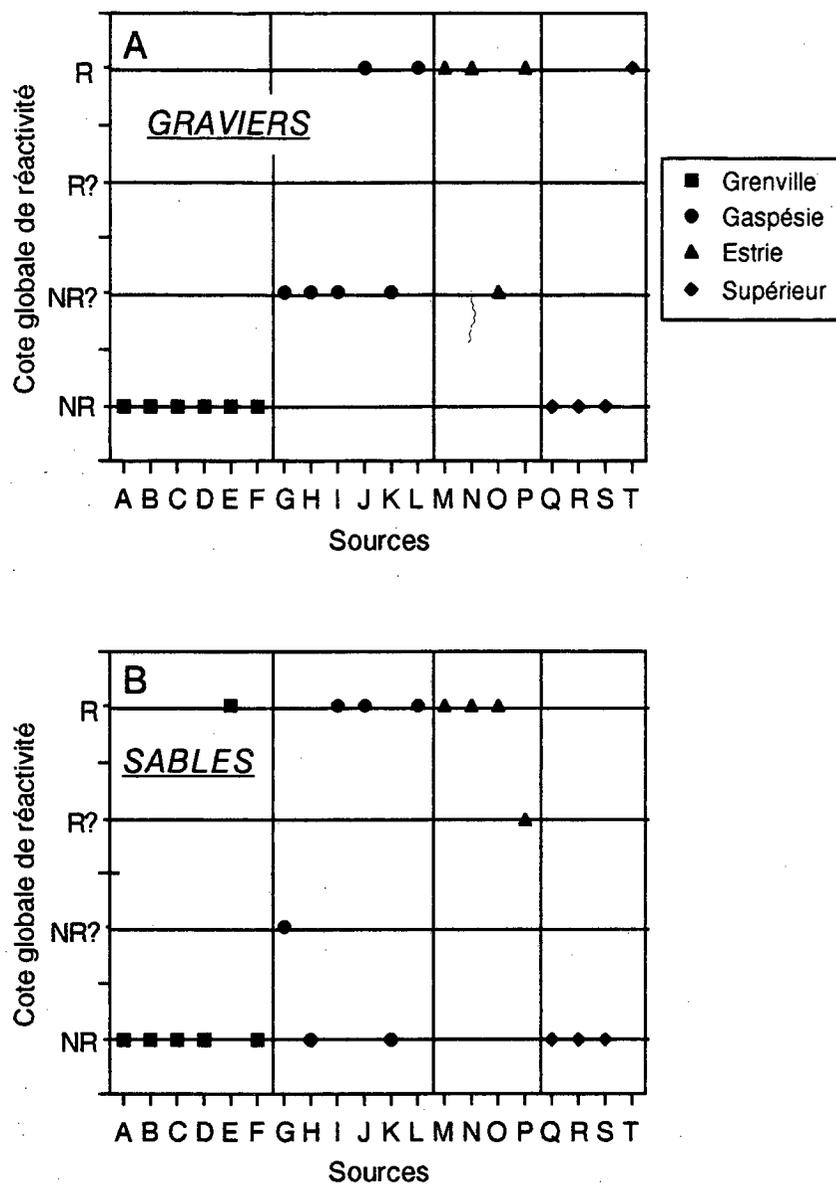


Figure 22. Cotes globales accordées aux graviers (A) et aux sables (B) quant à leur potentiel de réactivité alcaline dans le béton.

nous avons donc classé non réactifs ces deux graviers, mais avec réserve, considérant leur mauvais comportement à l'essai sur mortier ASTM C227.

- Graviers réactifs (cote R) (six échantillons). On retrouve dans ce groupe, en plus du granulats réactif de référence (T), deux graviers lithiques de la Gaspésie (J, L) et trois autres de l'Estrie (M, N, P). Tous ces échantillons échouent les deux essais accélérés sur mortier, l'essai sur béton ACNOR modifié (lorsqu'il a été effectué) et l'essai sur mortier ASTM C227, sauf L (qui satisfait à ce dernier essai, toutefois souvent trop peu sévère). En plus, résultat plus révélateur encore, les graviers L, M et T n'ont pas satisfait à l'essai sur béton ACNOR lorsque la limite d'expansion de 0,04% est appliquée à 18 mois plutôt qu'à un an.

Globalement, en excluant le gravier réactif de référence (T), 74% (14/19) des graviers québécois testés sont classés non réactifs, dont cinq avec réserve, alors que 26% (5/19) sont classés réactifs.

4.13.2 Évaluation des sables

Les sables ont été classés en quatre groupes: non réactifs (cote NR), non réactifs avec réserve (cote NR?), réactifs avec réserve (cote R?) et réactifs (cote R) (tableau 22 et figure 22B):

- Sables non réactifs (cote NR) (dix échantillons): ce groupe comprend cinq sables du Grenville (tous sauf E), les trois sables du Supérieur québécois, de même que deux sables lithiques de la Gaspésie (H, K). Tous ces échantillons passent l'essai sur mortier ASTM C227 et au moins l'un des deux essais accélérés sur mortier, soit l'essai à l'autoclave.
- Sables non réactifs avec réserve (cote NR?) (un échantillon): ce groupe ne comprend qu'un seul échantillon, de la Gaspésie (G). Ce sable passe l'essai accéléré sur mortier mais pas l'essai à l'autoclave, qui est pourtant généralement moins sévère que le premier. Le fait qu'il passe l'essai sur mortier ASTM C227 ne le lave cependant pas de tout soupçon, cet essai étant souvent trop peu sévère.
- Sables réactifs avec réserve (cote R?) (un échantillon): ce groupe ne comprend également qu'un seul échantillon, de l'Estrie (P). Ce sable passe l'un des deux essais accélérés sur mortier, soit l'essai à l'autoclave, ce qui est un point habituellement très positif, mais échoue malheureusement l'essai sur mortier ASTM C227, ce qui est plus inquiétant, puisque cet essai plutôt que trop sévère ne l'est généralement pas assez. Nous avons donc attribué à ce sable la cote réactif mais avec une certaine réserve.

- Sables réactifs (cote R) (sept échantillons). On trouve dans ce groupe un sable du Grenville (E), 3 sables lithiques de la Gaspésie (I, J, L) et 3 autres de l'Estrie (M, N, O). Tous ces échantillons ont échoué les trois essais sur mortier.

Globalement, 58% (11/19) des sables testés sont classés non réactifs (dont 1 avec réserve) et 42% (8/19) sont classés réactifs (dont également un avec réserve).

4.13.3 Comparaison entre les sables et les graviers de même provenance

On constate également aux tableaux 21 et 22 et à la figure 22 que la cote globale attribuée à un gravier donné se compare à celle attribuée au sable de même provenance (abstraction faite des réserves émises précédemment sur certaines cotes), à trois exceptions près seulement: les graviers E, I et O sont classifiés non réactifs (dont les deux derniers avec réserve), alors que les sables correspondants sont classés réactifs (sans aucune réserve). Les écarts observés dans les deux derniers cas ne peuvent pas s'expliquer par des différences de composition chimique, mais le sable E se distingue de tous les autres sables du Grenville par son contenu nettement plus important en carbonates (particules calcaires). À cette exception près, la correspondance est somme toute très bonne entre les sables et les graviers, considérant que les deux graviers I et O se sont classés non réactifs, on en convient, mais de façon marginale (c'est-à-dire «avec réserve»).

4.13.4 Sommaire et conclusion sur l'évaluation des granulats

Somme toute, tous les sables et graviers du Grenville et du Supérieur québécois (Abitibi) sont classés non réactifs, à l'exception d'un sable du Grenville (E), alors que seulement la moitié environ des sables et graviers des Appalaches (Gaspésie et Estrie) se sont classés non réactifs, dont plusieurs avec réserve.

L'application du schéma de la figure 23 mène à l'attribution des mêmes cotes globales que celles apparaissant aux tableaux 21 et 22, et à la figure 22, à deux exceptions près: le sable P, expansif aux essais sur mortier ASTM C227 et C9-P214, a été classé réactif mais avec réserve, considérant sa bonne performance à l'essai sur mortier à l'autoclave, pourtant sévère; le sable G, non expansif aux essais sur mortier ASTM C227 et C9-P214, a été classé non réactif mais avec réserve, considérant sa mauvaise performance à l'essai sur mortier à l'autoclave, habituellement moins sévère que l'essai accéléré sur mortier. Il faut rappeler que l'acceptation d'un granulat à partir du schéma de la figure 23 peut n'exiger dans certains cas qu'un seul essai accéléré sur mortier, ce qui serait le cas ici (c'est-à-dire acceptation du sable P et refus du sable

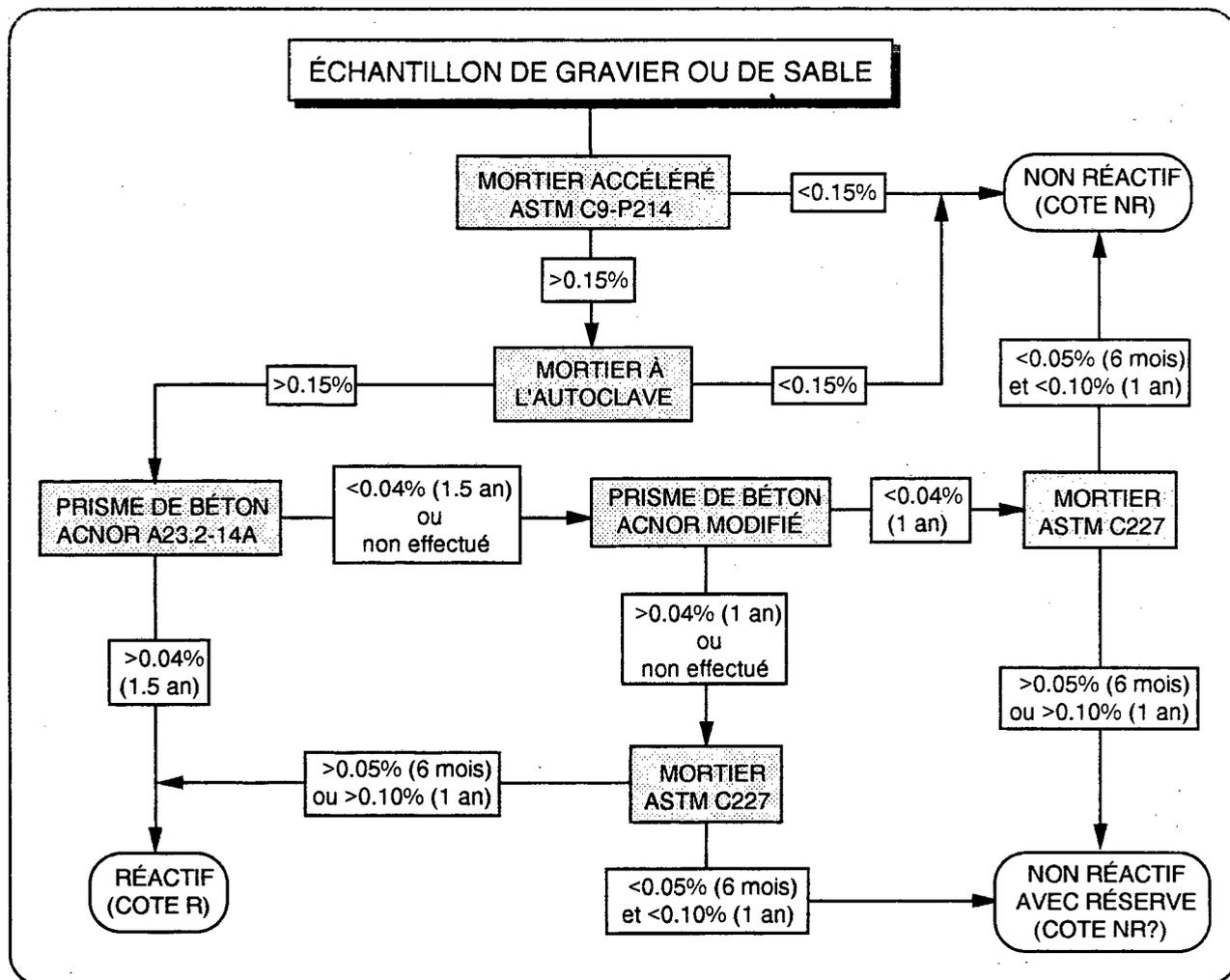


Figure 23. Organigramme de caractérisation du potentiel de réactivité alcaline applicable aux sables et aux graviers testés, à deux exceptions près: le sable P, expansif aux essais sur mortier ASTM C227 et C9-P214, a été classé réactif, mais avec réserve, considérant sa bonne performance à l'essai sur mortier à l'autoclave (?); le sable G, non expansif aux essais sur mortier ASTM C227 et C9-P214, a été classé non réactif, mais avec réserve, considérant sa mauvaise performance à l'essai sur mortier à l'autoclave (?).

G sur la seule base de l'essai à l'autoclave), alors que notre évaluation précédente tient compte des résultats obtenus pour l'ensemble des essais retenus, au nombre de cinq dans le cas des graviers et de trois dans le cas des sables. Nous croyons que l'évaluation différente du sable P est due à une erreur expérimentale lors de l'essai à l'autoclave (expansion trop faible) ou lors de l'essai ASTM C227 (expansion trop élevée). Une erreur lors du premier essai est plus probable car le gravier de la même source a quant à lui échoué l'essai à l'autoclave, tout en se montrant lui-aussi expansif à l'essai sur mortier ASTM C227. Or le sable P et le gravier P sont pratiquement identiques au point de vue de la composition chimique (voir tableaux 8 et 9). Dans le cas du sable G, on pense également qu'il y a eu erreur sur l'un ou l'autre des deux essais accélérés sur mortier, l'essai à l'autoclave s'avérant ici pour la première fois plus sévère que l'essai en immersion.

Ces anomalies de même que le comportement tout aussi inusité des graviers K et O (non expansifs sur béton ACNOR modifié mais expansifs sur mortier ASTM C227) confirment d'ailleurs qu'il est toujours plus prudent d'effectuer au moins deux essais différents de réactivité alcaline, dont idéalement un essai de longue durée sur béton. À tout le moins, si un seul essai est effectué, il devrait être répété, et ce à un autre moment et en reprenant à partir de zéro le calcul du mélange.

En terminant, il faut ici rappeler que tous les essais sur béton ont été effectués sur les échantillons de gravier, mais en présence d'un sable granitique non réactif de référence. Il est permis de croire que les graviers ou les sables classés non réactifs dans cette étude ne posent effectivement pas de problèmes s'ils sont utilisés avec un sable ou un gros granulat tout à fait inerte, selon le cas, mais que la combinaison des deux granulats d'une même source, en particulier dans le cas des Appalaches, pourrait entraîner des problèmes de réactivité alcaline dans le béton. Les évaluations effectuées pourraient donc s'avérer trop généreuses pour certaines des sources étudiées qui produisent toutes les deux types de granulats à béton. Rappelons à ce sujet que le gros granulat utilisé dans le barrage de Mactaquac passe l'essai ACNOR (expansion $<0,04\%$ à un an) lorsqu'il est testé en présence d'un sable non réactif, mais que le remplacement de ce sable par un autre comparable à celui utilisé originalement dans le barrage fournit des expansions nettement supérieures à la limite de $0,04\%$ à un an (Thompson 1990).

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1 LES ESSAIS DE RÉACTIVITÉ ALCALINE

Comme on a pu s'en rendre compte dans ce qui précède (section 4.12), les résultats obtenus dans le cadre de cette étude remettent en question l'efficacité et la validité de plusieurs essais normalisés ou proposés aux fins d'évaluation du potentiel de réactivité alcaline des granulats naturels dans le béton. Quant aux essais un peu plus recommandables, ils n'en demeurent pas moins pour la plupart soit trop sévères, ne pouvant donc servir que de norme d'acceptation, ou soit trop permissifs, ne pouvant alors servir que de norme de refus. On a pu également constater que la présence d'un échantillon de référence de réactivité bien connue ne règle pas nécessairement tous les problèmes d'interprétation et que l'expérience de l'ingénieur et la connaissance qu'il a des possibilités et des limites des différents essais deviennent donc des facteurs déterminants dans l'interprétation des résultats.

5.2 MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE POUR LA CARACTÉRISATION DU POTENTIEL DE RAG DES GRANULATS NATURELS

Le schéma de la figure 24 est proposé pour l'évaluation du potentiel de RAG des granulats naturels du Québec. Il tient compte des résultats et des commentaires précédemment énoncés. Son application aveugle pourrait encore entraîner quelques erreurs d'évaluation, comme dans le cas du sable P précédent. La stratégie sous-jacente à ce schéma est la suivante:

- 1) Le granulat doit d'abord répondre à un certain nombre d'exigences mécaniques.
- 2) Un granulat réactif peut être utilisé dans le cas d'un ouvrage qui n'est pas exposé à l'humidité, ce qui ne s'applique à toutes fins pratiques qu'aux éléments de béton situés à l'intérieur d'édifices. Dans un tel cas, il n'est même pas nécessaire de procéder à l'évaluation du potentiel de RAG du granulat.
- 3) Le meilleur essai d'évaluation d'un granulat est sa performance en service. À cet égard, un certain nombre de conditions doivent être remplies afin de pouvoir poser un diagnostic fiable: source utilisée depuis plusieurs années, ouvrages exposés à l'humidité, contenus en

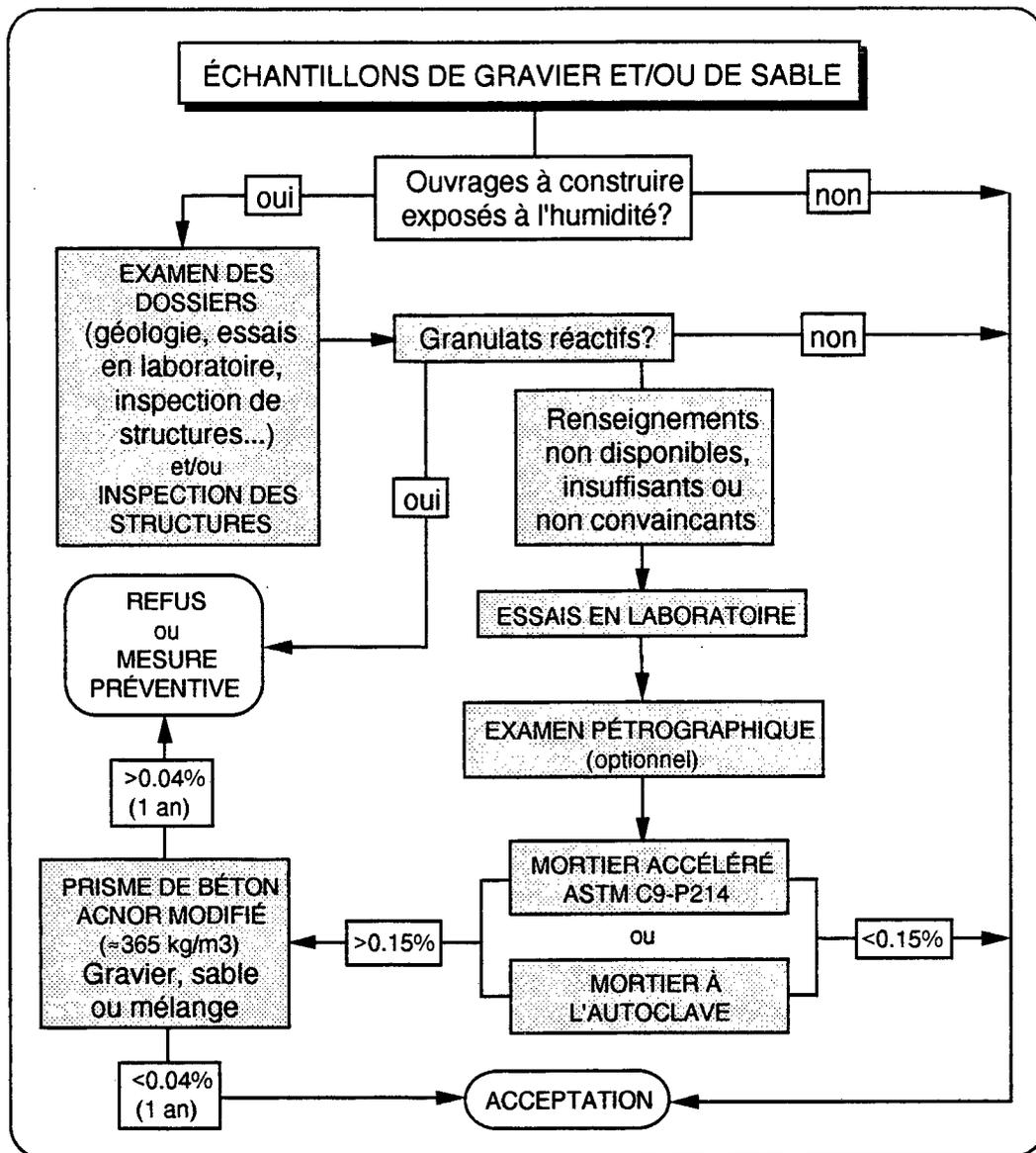


Figure 24. Organigramme proposé pour l'évaluation du potentiel de réactivité alcaline, dans le béton de ciment, des sables et graviers naturels du Québec.

alcalis suffisants dans le béton pour y générer des RAG, constance dans les caractéristiques géologiques de la source, etc. Lorsque ces conditions ne sont pas remplies ou que les renseignements concernant la performance en service d'un granulat sont non disponibles, insuffisants ou non convaincants, on n'a pas d'autre choix que de procéder à des essais en laboratoire.

- 4) À ce sujet, sur la base des résultats obtenus dans cette étude, nous ne recommandons que quatre essais: (1) l'examen pétrographique (à titre optionnel); (2) l'essai accéléré sur mortier ASTM C9-P214 ou (3) l'essai sur mortier à l'autoclave, et (4) l'essai ACNOR modifié sur béton (dosage en ciment d'environ 365 kg/m^3).
- 5) L'examen pétrographique a surtout ici pour but d'évaluer la composition pétrographique du granulat naturel à l'étude. À ce titre, un simple examen mégascopique pourrait suffire. Un examen microscopique plus poussé en lames minces peut bien sûr fournir des informations intéressantes, mais pourrait difficilement servir de norme d'acceptation ou de refus en raison de la composition pétrographique relativement complexe des sables et des graviers naturels.
- 6) Les résultats obtenus dans cette étude permettent de considérer comme non réactifs les échantillons qui passent avec succès l'essai accéléré sur mortier ASTM C9-P214 (expansion $<0,15\%$ à 14 jours) ou l'essai à l'autoclave (expansion $<0,15\%$ à 5 heures). L'expérience acquise jusqu'ici sur un grand nombre d'autres granulats de composition très variée (calcaires, granulats silicatés de carrière) nous incite en effet à penser que ces deux essais très sévères sont par contre fiables comme norme d'acceptation. L'essai sur mortier à l'autoclave, moins sévère que l'essai ASTM, peut paraître plus attrayant, mais il est également de réalisation plus complexe et très peu répandu; il devrait donc n'être réalisé que par un laboratoire expérimenté. En accord avec les remarques précédentes, si on envisage au départ de ne procéder à un essai sur béton que si le granulat s'est d'abord montré expansif à un essai accéléré sur mortier, afin de s'assurer de la fiabilité du résultat, on répétera cet essai accéléré, et ce à un autre moment et en reprenant à partir de zéro le calcul du mélange.
- 7) Quant à l'essai sur béton, étant donné qu'un dosage en ciment de 310 kg/m^3 ne semble pas assez sévère (même en attendant un an et demi), alors qu'un dosage de 410 kg/m^3 l'est trop quant à lui, nous recommandons un dosage intermédiaire de 365 kg/m^3 et un rapport eau/ciment de 0,50, deux caractéristiques du mélange qui sont d'ailleurs plus proches des dosages les plus habituellement utilisés dans la pratique. L'essai est recommandé pour tester

soit un gravier (en présence d'un sable non réactif), soit un sable (en présence d'un granulats grossier non réactif), ou soit un mélange sable/gravier utilisé dans la pratique. Cette dernière option est fortement recommandée dans le cas de sources fournissant à la fois les deux types de granulats à béton. La limite d'acceptation recommandée est de 0,04% à un an. Dans le cas où l'essai est utilisé pour tester un sable (en présence d'un gros granulats tout à fait inerte) ou un gravier (en présence d'un sable tout à fait inerte), la limite pourrait être repoussée à un an et demi, de façon à tenir compte de la possibilité que l'autre granulats qui sera utilisé en pratique avec le granulats à l'étude pourrait tout de même être suffisamment expansif pour que la combinaison des deux granulats puisse poser problème.

5.3 MISES EN GARDE QUANT AUX RÉSULTATS OBTENUS

Nous avons attribué précédemment à chacun des granulats naturels testés une cote globale quant à leur potentiel de réactivité alcaline dans le béton (section 4.13). Comme nous avons pu clairement le réaliser, cette cote n'est pas d'une certitude absolue. Pour bien respecter les conditions prévalant dans les structures, il aurait été par exemple plus réaliste de tester ensemble le sable et le gravier fournis par une même source. Les essais sur béton n'ont en effet été effectués que sur les graviers, et ce en présence d'un sable granitique tout à fait inerte. La combinaison des deux types de granulats d'une même source, surtout dans le cas des Appalaches, risque d'entraîner malgré tout des problèmes de RAG dans le béton, même si les deux granulats s'en sortent bien lorsqu'ils sont évalués individuellement. Les cotes attribuées pourraient donc s'avérer trop généreuses, puisque dans la pratique les sources étudiées produisent à la fois les deux types de granulats.

L'organigramme de la figure 24 propose une méthode pour évaluer de la manière la plus rapide et la plus fiable possible un gravier et/ou un sable naturel. La séquence d'essais proposée n'est pas absolument rigoureuse et peut dans certains cas être court-circuitée si l'ingénieur juge selon son expérience que les informations disponibles sont suffisantes pour cela.

Il faut également garder à l'esprit que des résultats de laboratoire ne peuvent en aucun cas remplacer les données existantes sur la performance en service des granulats. L'inspection systématique des ouvrages en béton fabriqués avec des granulats naturels n'a malheureusement pu être réalisée comme nous l'avions souhaité au début du projet. Les résultats d'une telle inspection, couplés à ceux obtenus ici en laboratoire, auraient permis d'apporter encore plus de certitude sur la réactivité de ces matériaux dans le béton de même que sur la méthodologie à suivre quant à l'évaluation de cette réactivité en laboratoire. Le manque d'information sur la

performance en service des sables et graviers naturels du Québec laisse donc encore planer un certain doute sur leur véritable potentiel de réactivité dans le béton, doute qui sera toutefois levé dès que l'inspection des ouvrages aura été complétée.

5.4 MESURES DE PRÉVENTION

Dans l'immédiat, on considérera comme potentiellement réactifs dans le béton les graviers et sables classés précédemment comme réactifs ou réactifs avec réserve (tableaux 21 et 22). On peut toutefois les utiliser dans le béton en prenant certaines mesures préventives, et ce, en fonction du type d'ouvrage à construire et des conditions d'exposition auxquelles cet ouvrage sera soumis. L'organigramme de la figure 25 tient compte de ces possibilités et indique les mesures à apporter dans chaque cas. Ces recommandations reposent sur les faits suivants:

- Les granulats classés réactifs, avec ou sans réserve, ne devraient être utilisés dans les bétons de masse (barrages...), de toute apparence plus sensibles aux réactions alcalis-granulats, qu'en présence d'un bon ciment commercial à fumée de silice, d'une bonne cendre volante ($<4,5\% \text{ Na}_2\text{O}_e$; ≥ 20 à 30% en remplacement du ciment, selon la composition de la cendre) ou d'un bon laitier de haut-fourneau ($<1\% \text{ Na}_2\text{O}_e$; $\geq 50\%$ en remplacement du ciment), en autant que le contenu total en alcalis du béton ne dépasse pas $3,0 \text{ kg/m}^3$ (CSA 1992) (voir notes 1 et 2 au bas de cette page).

Note 1

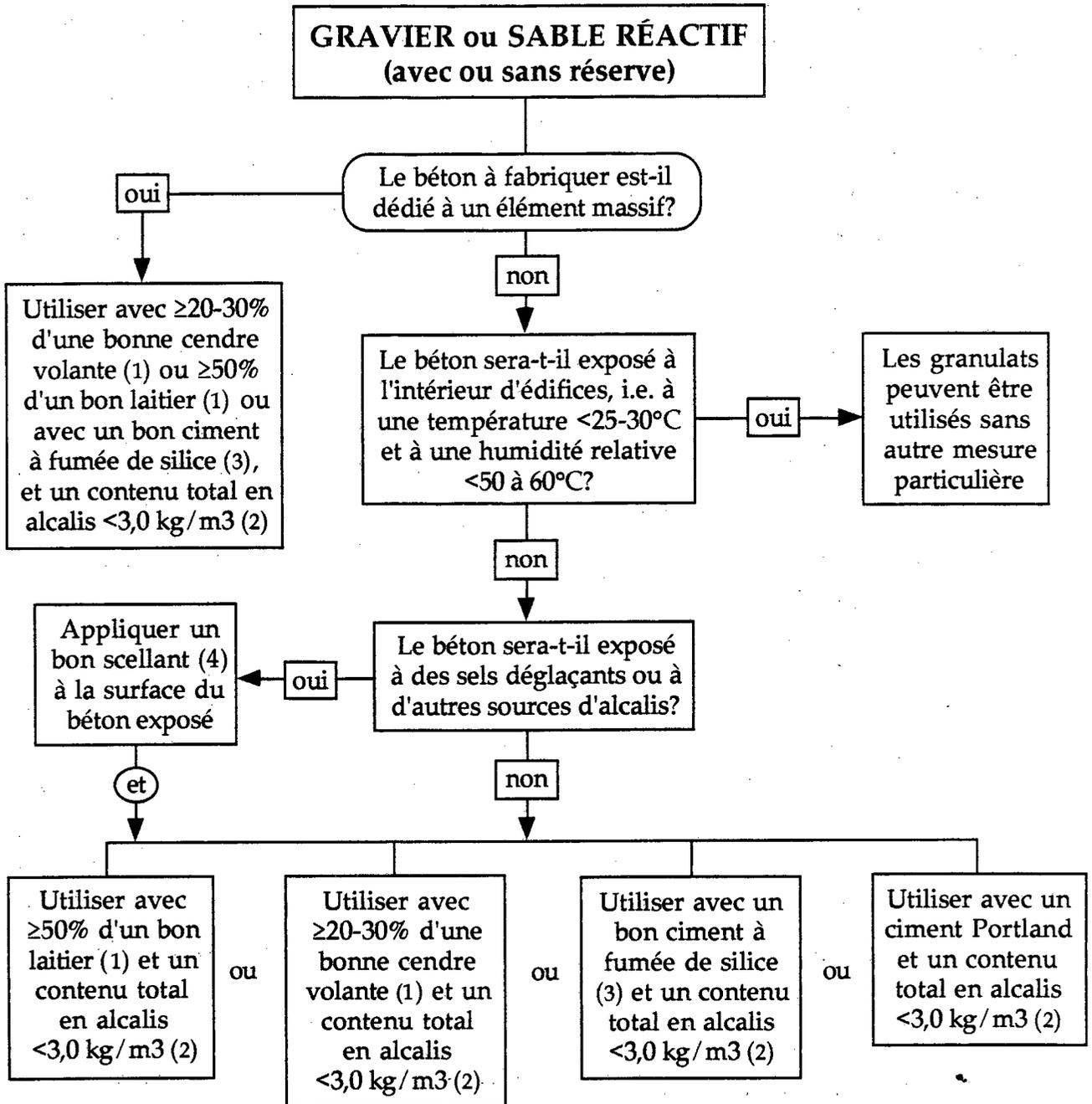
Dans le calcul du contenu total en alcalis du béton, on fera la somme des contributions individuelles de chaque constituant cimentaire, en utilisant 100% des alcalis du ciment Portland, 50% de ceux de la fumée de silice et du laitier, mais seulement 15% des alcalis de la cendre volante (CSA 1992). Le calcul se fait comme suit:

$$\begin{aligned} \text{Contenu total en alcalis du béton (kg/m}^3\text{)} = & \\ & [\text{ciment Portland (kg/m}^3\text{)} \times \% \text{ éq. Na}_2\text{O du ciment Portland /100}] + \\ & [\text{fumée de silice (kg/m}^3\text{)} \times 0,50 \times \% \text{ éq. Na}_2\text{O de la fumée de silice /100}] + \\ & [\text{laitier de haut-fourneau (kg/m}^3\text{)} \times 0,50 \times \% \text{ éq. Na}_2\text{O du laitier /100}] + \\ & [\text{cendre volante (kg/m}^3\text{)} \times 0,15 \times \% \text{ éq. Na}_2\text{O de la cendre volante /100}] + \end{aligned}$$

Dans le cas de ciments prémélangés avec fumée de silice ou laitier de haut-fourneau, on pourra utiliser la teneur totale en alcalis du mélange. Il faudrait toutefois connaître les proportions cendre volante/ciment Portland et les teneurs respectives en alcalis de ces deux constituants dans le cas de ciments prémélangés avec cendre volante.

Note 2

Par exemple, une limite supérieure de 3 kg/m^3 (éq. Na_2O) sur le contenu total en alcalis de béton signifie qu'on pourra fabriquer des bétons avec 300 kg/m^3 de ciment Portland contenant 1,0% d'alcalis, ou 350 kg/m^3 de ciment contenant 0,86% d'alcalis, ou 400 kg/m^3 de ciment contenant 0,75% d'alcalis, etc., dans la mesure toutefois où le béton n'est pas soumis par la suite à d'autres sources d'alcalis (sels déglacants, etc.).



- (1) Les dosages sont en remplacement massique du ciment. On peut considérer qu'une bonne cendre volante contient moins de 4,5% d'alcalis (Na_2O éq.) et qu'un bon laitier granulé et broyé de haut-fourneau en contient moins de 1,0% (CSA 1992). Le dosage minimal en cendre dépend de sa composition chimique (teneur en alcalis, silice et alumine) (CSA 1992).
- (2) Voir la section 5.4 de ce rapport pour le calcul du contenu total en alcalis du béton.
- (3) Les ciments SF présentement disponibles au Québec sont considérés comme bons.
- (4) Un scellant à base de silane est normalement très bon mais, sur la base de travaux en cours à l'Université Laval, pourrait nuire à la durabilité au gel du béton, en présence de sels (écaillage).

Figure 25. Organigramme proposé pour l'utilisation, dans le béton de ciment, des sables et graviers naturels classés réactifs ou réactifs avec réserve.

- Pour les autres types de béton, aucune mesure particulière n'est normalement requise si le béton est exposé à l'intérieur d'édifices, i.e. à des températures inférieures à 25 ou 30°C et à des conditions d'humidité relative inférieures à 50 ou 60%.
- Des essais en laboratoire réalisés au MTQ ont indiqué qu'un contenu en alcalis de 3,0 kg/m³ de béton, en l'absence de fumée de silice, de cendre volante ou de laitier, suffit à réduire à moins de 0,04% à un an l'expansion du béton fabriqué avec des granulats faiblement à moyennement réactifs (Bérubé et al. 1990), ce que sont tout au plus les sables et graviers classés réactifs ou réactifs avec réserve dans cette étude. Un contenu maximal de 3,0 kg/m³ est donc suggéré dans le cas des bétons exposés à l'extérieur. Un ciment commercial à fumée de silice comme ceux présentement disponibles sur le marché québécois, un ciment contenant au moins 20 à 30% d'une bonne cendre volante (<4,5% Na₂O_e) ou 50% d'un bon laitier (<1% Na₂O_e) constitue certes une garantie supplémentaire, en autant que le contenu total en alcalis du béton ne dépasse toujours pas 3,0 kg/m³ (CSA 1992) (voir notes 1 et 2 au bas de la page précédente). Le dosage minimal requis en cendre volante dépend de la composition de cette cendre (CSA 1992).
- Les sels déglacants fournissent des alcalis supplémentaires au béton. Les granulats classés réactifs dans cette étude, avec ou sans réserve, ne devraient pas être utilisés dans le cas de bétons exposés à des sels déglacants, même en présence de fumée de silice, de cendre volante ou de laitier, à moins qu'un scellant efficace (normalement à base de silane) soit appliqué à la surface exposée du béton. Mentionnons par ailleurs qu'un scellant, même le meilleur, peut nuire à la durabilité au gel, en présence de sels, des bétons pourvus d'un bon réseau de bulles d'air, i.e. favoriser l'écaillage de ces bétons, alors qu'il peut par ailleurs réduire l'écaillage d'autres bétons mal protégés contre le gel (travaux en cours à l'Université Laval).

On ne saurait terminer sans rappeler que les informations accumulées jusqu'à maintenant sur la performance des granulats naturels dans le béton en service, bien que limitées, montrent que ces matériaux ont une bien meilleure performance globale que les calcaires des Basses-Terres du Saint-Laurent et les schistes à chlorite de la région de Sherbrooke, par exemples (Vézina & Fournier 1989; Bérubé et al. 1990).

RÉFÉRENCES

- BÉRARD, J. & ROUX, R. (1986): La viabilité des bétons du Québec: le rôle des granulats. *Revue Canadienne de Génie Civil*, Vol. 13, pp. 12-24.
- BÉRUBÉ, M.A. & DUCHESNE, J. (1992a): Evaluation of Testing Methods for Assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppressing Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction. 4th CANMET-ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul (Turquie), Mai 1992, ACI SP-132, pp. 549-575.
- BÉRUBÉ, M.A. & DUCHESNE, J. (1992b): Does Silica Fume Merely Postpone Expansion Due to Alkali-Aggregate Reactivity? *Compte rendus 9th Int. Conf. on AAR in concrete*, Londres, Juillet 1992, pp. 71-80.
- BÉRUBÉ, M.A. & FOURNIER, B. (1986): Les produits de la réaction alcalis-silice dans le béton: étude de cas de la région de Québec. *Canadian Mineralogist*, Vol. 24, pp. 271-288.
- BÉRUBÉ, M.A. & FOURNIER, B. (1987): Le barrage Sartigan dans la Beauce (Québec, Canada): un cas type de détérioration du béton par des réactions alcalis-granulats. *Revue Canadienne de Génie Civil*, Vol. 14, 372-380.
- BÉRUBÉ, M.A. & FOURNIER, B. (1989): Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Quebec. *Compte-rendus du 1^{er} Colloque Canadien sur le Ciment et le Béton*, Québec, Août 1989, 10 p.
- BÉRUBÉ, M.A. & FOURNIER, B. (1990): Canadian Experience with Rapid Testing Methods for Alkali-Aggregate Reactivity. *Comptes rendus du CANMET Int. Workshop on AAR in concrete: occurrences, testing and control*, Halifax, Mai 1990, 32 p.
- BÉRUBÉ, M.A. & FOURNIER, B. (1991): Testing Field Concrete for Further Expansion Due to Alkali-Aggregate Reactivity. *Petrography and Alkali-Aggregate Reactivity - Course Manual*, Chapitre 6, CANMET/EMR, Ottawa, Mars 1991, pp. 283-349.
- BÉRUBÉ, M.A. & FOURNIER, B. (1992): Accelerated Test Methods for Alkali-Aggregate Reactivity. *Comptes rendus de CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology*, Athènes (Grèce), Mai 1992, pp. 583-627.
- BÉRUBÉ, M.A., FOURNIER, B. & FRENETTE, J. (1987): Évaluation de la qualité de granulats provenant de carrières, de gravières et de sablières appartenant à Béton Québec Inc., Rapport GGL-87-13, Université Laval, Sainte-Foy, 250 p.
- BÉRUBÉ, M.A., CLAVEAU, A., FOURNIER, B. & VÉZINA, D. (1988): Inspection des structures de béton de la région de Québec construites avec des matériaux calcaires. *Études et Recherches en Transport*, MTQ, 81 p.
- BÉRUBÉ, M.A., FOURNIER, B., VÉZINA, D., FRENETTE, J., DUCHESNE, J. & CHOQUETTE, M. (1989a): Les réactions alcalis-granulats dans le béton. Cahier 1: Notes de cours, Cours GGL-A0487, Rapport GGL-89-16, Département de géologie, Université Laval, Sainte-Foy, 362 p.

- BÉRUBÉ, M.A., FOURNIER, B. & FRENETTE, J. (1989b): Détérioration de fondations de pylones d'ancrage de lignes de transport d'électricité par des réactions alcalis-granulats - Performance mécanique et réparation du béton. *Revue Canadienne de Génie Civil*, Vol. 16, pp. 945-959.
- BÉRUBÉ, M.A., FOURNIER, B., & VÉZINA, D. (1990): Les réactions alcalis-granulats au Québec: où en sommes nous? *Comptes rendus de la 43^e Conférence canadienne de géotechnique*, Québec, Octobre 1990, pp. 481-492.
- BÉRUBÉ, M.A., FOURNIER, B., MONGEAU, P., DUPONT, N., OUELLET, C. & FRENETTE, J. (1992a): Effectiveness of the Accelerated Mortar Bar Method, ASTM C 9 - Proposal - P 214 or NBRI, for Assessing Potential AAR in Québec (Canada). *Comptes rendus 9th Int. Conf. on AAR in concrete*, Londres, Juillet 1992, pp. 92-101.
- BÉRUBÉ, M.A., FOURNIER, B., DUPONT, N., MONGEAU, P. & FRENETTE, J. (1992b): A Simple Autoclave Mortar Bar Method for Assessing Potential Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete. *Comptes rendus 9th Int. Conf. on AAR in concrete*, Londres, Juillet 1992, pp. 81-91.
- BÉRUBÉ, M.A., PIGEON, M., DUPONT, N., FRENETTE, J. & LANGLOIS, M. (1992c): Expansion Test Methods for Mass Concrete Exposed to Alkali-Aggregate Reaction - Project CEA N° 715 G 687. *Canadian Electrical Association*, Montréal, 99 p. + annexes.
- BLANCHETTE, A. (1989): Évaluation du potentiel de réactivité aux alcalis de granulats à béton par un essai accéléré. *Mémoire de maîtrise en sciences appliquées*, École polytechnique de Montréal, 201 p.
- CSA (1992): Proposed Changes to CSA A23.1 and A23.2 as Regards Alkali-Aggregate Reactivity and Associated Test Methods. *Cement-Aggregate Reactivity Sub-Committee CSA-A5 Task Group*, Septembre 1992, 84 p.
- DAVIES, G. & OBERHOLSTER, R.E. (1987): An Interlaboratory Test Program on the NBRI Accelerated Test to Determine the Alkali Reactivity of Aggregates. *NBRI Special Report BOU 92*, 16 p.
- DEMERCHANT, D.P. & SOLES, J.A. (1990): CANMET Research on Alkali-Aggregate Reactivity in New-Brunswick. *Comptes-rendus du CANMET International Workshop on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete: Occurrences, Testing and Control*, Halifax, Mai 1990, 35 p.
- DIAMOND, S. (1989): ASR - Another Look at Mechanisms. *Comptes-rendus 8th Int. Conf. on AAR in Concrete*, Kyoto (Japon), Juillet 1989, pp. 797-802.
- DOLAR-MANTUANI, L. (1969): Alkali-Silica Reactive Rocks in the Canadian Shield. *Highway Research Record*, N° 268, pp. 99-117.
- DOLAR-MANTUANI, L. (1983): *Handbook of Concrete Aggregate - a Petrographic and Technological Evaluation*. Noyes Publication, New-Jersey, 345 p.
- DUCHESNE, J. & BÉRUBÉ, M.A. (1992a): Relationships Between Portlandite Depletion, Available Alkalies and Expansion of Concrete Made With Mineral Admixtures. *Comptes rendus 9th Int. Conf. on AAR in concrete*, Londres, Juillet 1992, pp. 287-297.

- DUCHESNE, J. & BÉRUBÉ, M.A. (1992b): An Autoclave Mortar Bar Test for Assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppressing Expansion Due to AAR. *Comptes rendus 9th Int. Conf. on AAR in concrete*, Londres, Juillet 1992, pp. 279-286.
- DUNCAN, M.A.G., SWENSON, E.G., GILLOTT, J.E. & FORAN, M.R. (1973): Alkali-Aggregate Reaction in Nova Scotia: I. Summary of a Five Year Study. *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, 55-70.
- DUPONT, N. (1990): Essai à l'autoclave: détermination des conditions de l'essai et application à divers granulats silicatés de la province de Québec. *Projet de fin d'étude*, Département de Géologie, Université Laval, Sainte-Foy, 25 p. + annexes.
- FOURNIER, B. (1992): Contribution à l'étude de la durabilité des structures de béton construites avec des granulats calcaires produits dans les Basses-Terres du Saint-Laurent du Québec: Les réactions alcalis-granulats. *Thèse de doctorat*, Université Laval, Sainte-Foy.
- FOURNIER, B. & BÉRUBÉ, M.A. (1990): Evaluation of a Modified Chemical Method to Determine the Alkali-Reactivity Potential of Siliceous Carbonate Aggregates. *Canadian Developments in Testing Concrete Aggregates for Alkali-Aggregates Reactivity*, Ministry of Transportation of Ontario, Rapport EM-92, pp.118-135.
- FOURNIER, B. & BÉRUBÉ, M.A. (1991a): Évaluation du potentiel de réactivité alcaline des granulats à béton produits dans les Basses-Terres du Saint-Laurent du Québec. *Revue Canadienne de Génie civil*, Vol.18, pp. 282-296.
- FOURNIER, B. & BÉRUBÉ, M.A. (1991b): Application of the NBRI Accelerated Mortar Bar Test to Siliceous Carbonate Aggregates Produced in the St.Lawrence Lowlands (Quebec, Canada). Part I: Influence of Various Parameters on the Test Results. *Cement and Concrete Research*, Vol.21, pp. 853-862.
- FOURNIER, B. & BÉRUBÉ, M.A. (1991c): Application of the NBRI Accelerated Mortar Bar Test to Siliceous Carbonate Aggregates Produced in the St.Lawrence Lowlands (Quebec, Canada). Part II: Proposed Limits, Rates of Expansion, and Microstructure of Reaction Products. *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, pp. 1069-1082.
- FOURNIER, B. & BÉRUBÉ, M.A. (1991d): General Notions on Alkali-Aggregate Reactions. *Petrography and Alkali-Aggregate Reactivity - Course Manual*, Chapitre 1, CANMET/EMR, Ottawa, Mars 1991, pp. 7-69.
- FOURNIER, B. & BÉRUBÉ, M.A. (1993): The Use of the Gel Pat Test to Evaluate the Potential Alkali-Reactivity of Carbonate Aggregates of the St.Lawrence Lowlands of Quebec (Canada). *International Journal of Cement Composites*, sous presse.
- FOURNIER, B., BÉRUBÉ, M.A. & BERGERON, G. (1991): A Rapid Autoclave Mortar Bar Method to Determine the Potential Alkali-Silica Reactivity of St.Lawrence Lowlands Carbonate Aggregates (Quebec, Canada). *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 13, pp. 58-71.
- GERVAIS, F.A., ARSENAULT, P.J. & CHIASSON, J.S. (1990): AAR Research for Concrete Structures in Nova-Scotia. *Canadian Developments in Testing Concrete Aggregates for Alkali-Aggregate Reactivity*, Ministry of Transportation of Ontario, Rapport EM-92, pp. 50-60.

- GRATTAN-BELLEW, P.E. (1981a): Canadian Experience of Alkali-Expansivity in Concrete. Comptes rendus 5th Int. Conf. on AAR in concrete, Cape-Town (Afrique du Sud), papier S252/6, 11 p.
- GRATTAN-BELLEW, P.E. (1981b): A Review of Test Methods for Alkali-Expansivity of Concrete Aggregates. Comptes rendus 5th Int. Conf. on AAR in concrete, Cape Town (Afrique du Sud), papier S252/9, 13 p.
- GRATTAN-BELLEW, P.E. (1982): Preliminary Report on Potential Alkali-Aggregate Reactivity of Aggregates from the Hébert Quarry, Sherbrooke, Quebec. National Research Council of Canada, Ottawa, 8 p.
- GRATTAN-BELLEW, P.E. (1987): Is High Undulatory Extinction in Quartz Indicative of Alkali-Expansivity of Granite Aggregates? Comptes rendus 7th Int. Conf. on AAR in concrete, Ottawa (Canada), Août 1986, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 434-439.
- GRATTAN-BELLEW, P.E. (1990): Canadian Experience with Mortar Bar Rapid Tests for AAR. Canadian Developments in Testing Concrete Aggregates for Alkali-Aggregates Reactivity. Ministry of Transportation of Ontario, Rapport EM-92, pp. 17-34.
- GRATTAN-BELLEW, P.E. & ROGERS, C.A. (1985): National Research Council Studies of Alkali-Aggregate Reaction Systems and Test Methods. Comptes-rendus du International Workshop on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete and Construction and Rehabilitation of Concrete Parking Structures, Montréal, Mai 1985, 20 p.
- HOBBS, D.W. (1988): Alkali-silica Reaction in Concrete. Thomas Telford Ltd. Publisher, London, 182 p.
- JONES, F.E. & TARLETON, R.D. (1958): Reactions Between Aggregates and Cement. National Buildings Studies, Research Paper No. 25, Her Majesty's Stationary Office, London, 64 p.
- KRELL, J. (1987): Influence of Mix Design on Alkali-Silica Reaction in Concrete. Comptes rendus 7th Int. Conf. on AAR in concrete, Ottawa, Août 1986, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 441-445.
- MAGNI, E.R., ROGERS, C.A. & GRATTAN-BELLEW, P.E. (1987): The Influence of the Alkali-Silicate Reaction on Structures in the Vicinity of Sudbury. Comptes-rendus 7th Int. Conf. on AAR, Ottawa, Août 1986, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 17-22.
- MIELLENZ, R.C., GREENE, K.T. & BENTON, E.J. (1947): Chemical Test for Reactivity of Aggregates with Cement Alkalies. Chemical Processes in Cement-Aggregates Reaction. Journal of ACI, Vol. 19, pp. 193-219.
- NATASEIYER, K. & HOOVER, K.C. (1987): Investigation of Electrical Effects on Alkali-Aggregate Reaction. Comptes-rendus 7th Int. Conf. on AAR, Ottawa, Août 1986, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 466-471.
- NISHIBAYASHI, S., YAMURA, K. & MATSUHITA, H. (1987): A Rapid Method of Determining the Alkali-Aggregate Reaction in Concrete by Autoclave. Comptes-rendus 7th Int. Conf. on AAR, Ottawa, Août 1986, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 299-303.

- 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.
- OUELLET, C. (1988): Détermination du potentiel de réactivité alcaline dans le béton des granulats silicatés du Québec et développement d'essais accélérés de caractérisation. *Mémoire de maîtrise, Université Laval, Sainte-Foy*, 100 p.
- RAPHAËL, S., SARKAR, S.L. & AITCIN, P.C. (1989): Alkali-Aggregate Reactivity - Is It Always Harmful? *Comptes-rendus 8th Int. Conf. on AAR, Kyoto (Japon), Juillet 1989*, pp. 809-814.
- ROGERS, C.A. (1990): Concrete Test Expansion Testing to Evaluate Slow/Late Expanding Alkali-Silicate/Silica Reactive Aggregates. *Canadian Developments in Testing Aggregates for Alkali-Aggregates Reactivity, Ministry of Transportation of Ontario, Rapport EM-92*, pp. 96-111.
- ROGERS, C.A. & HOOTON, R.D. (1989): Leaching of Alkalies in Alkali-Aggregates Reaction Testing. *Comptes-rendus 8th Int. Conf. on AAR, Kyoto (Japon), Juillet 1989*, pp. 327-332.
- SWENSON, E.G. & GILLOTT, J.E. (1964): Alkali-Carbonate Rock Reaction. *Highway Research Record, N° 45*, pp. 21-40.
- TAMURA, H., HOSHINO, Y. & SAITO, H. (1984): An Experiment on Rapid Identification of Alkali Reactivity of Aggregates. *CAJ review*, pp. 100-103.
- TANG, M.S., HAN, S.F., ZHEN, S.H., YUAN, M.Q., YE, Y.F. & LU, Y.N. (1987): Applications of Autoclave Rapid Test Method in Practical Engineering Projects in China. *Comptes rendus de la 7th Int. Conf. on AAR in concrete, Ottawa, Août 1986, Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur*, pp. 294-298.
- THOMPSON, G.A. (1990): Alkali-Aggregate Reactivity Remedial Measures Mactaquac Intake Structures. *Comptes-rendus du CANMET Int. Workshop on AAR in concrete: Occurrences, Testing and Control, Halifax, Mai 1990*, 20 p.
- VAN AARDT & VISSER (1977): Formation of Hydrogarnets: Calcium Hydroxyde Attack on Feldspar and Clays: Relevance to Cement-Aggregates Reactions. *Cement and Concrete Research, Vol. 7*, pp. 643-648.
- VAN AARDT & VISSER (1982): Progress Report, Part 2. *CSIR Research Report BRR 577, Pretoria (Afrique du Sud)*.
- VÉZINA, D. & CLAVEAU, A. (1983): Rapport d'expertise de la dalle de béton de l'autoroute de Bécancour, *Ministère des Transports du Québec*.
- VÉZINA, D. & FOURNIER, B. (1989): Évaluation de structures de béton construites avec différents granulats du Québec. *Comptes rendus du Premier Colloque Canadien sur le Ciment et le Béton, Université Laval, Sainte-Foy, Août 1989*, 11 p.

ANNEXE A

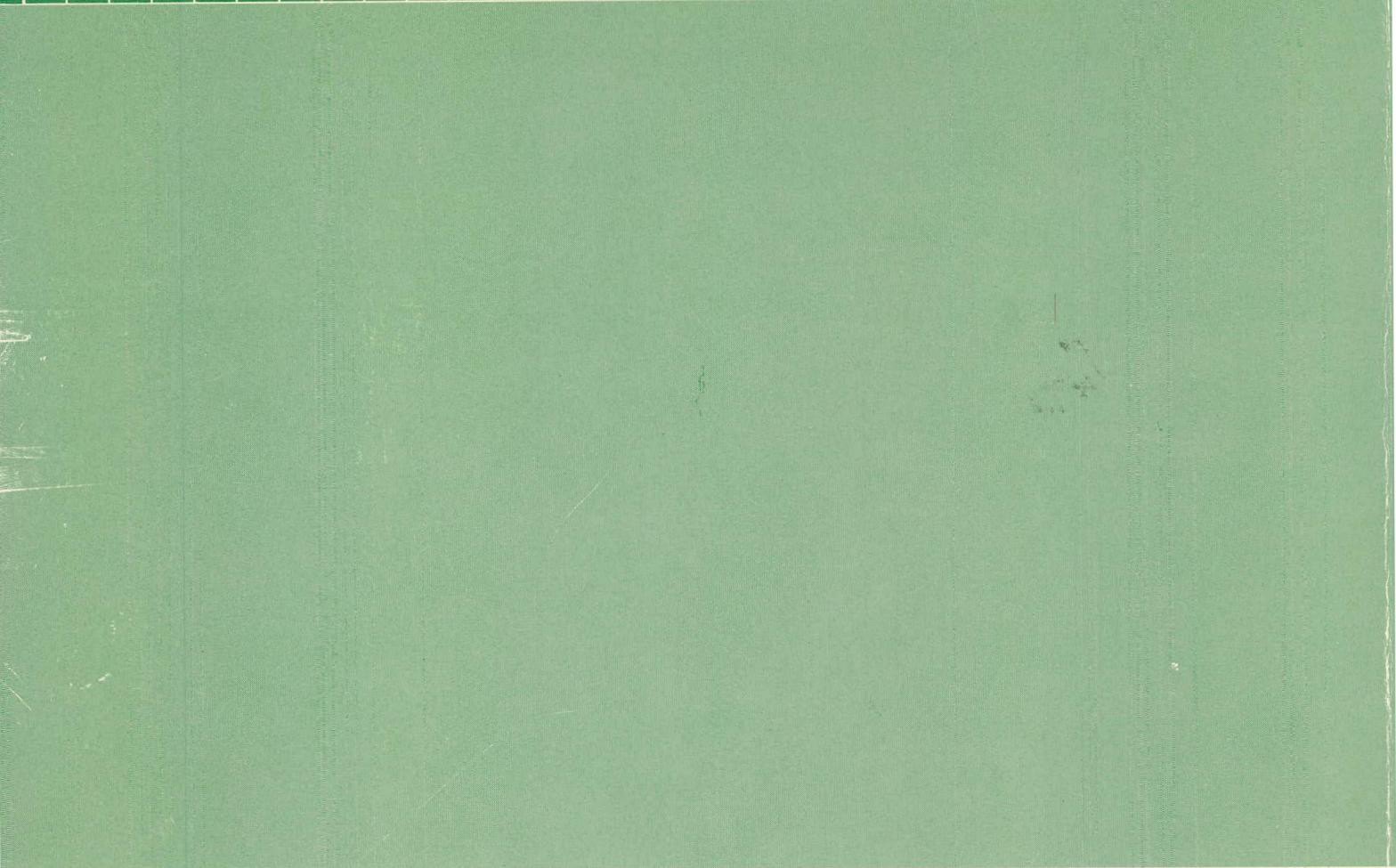
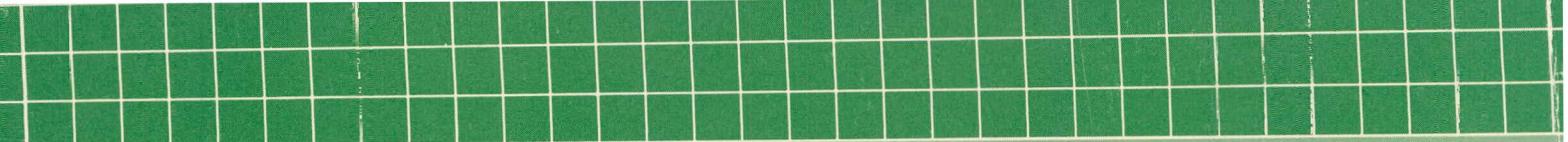
SOMMAIRE DES INFORMATIONS RECUEILLIES SUR LE SITE DES EXPLOITATIONS VISITÉES

Source	Épaisseur du banc (m)	Origine du dépôt	Granulométrie (%)	Péetrographie	Concasseurs	Forme des particules
A	-	-	-	gneiss granitique	-	anguleuse
B	7	fluvioglaciaire	gravier 50 sable 40 fines 10	gneiss granitique	à mâchoires et à cônes	anguleuse
C	9	fluvioglaciaire moraine	gravier 10 sable 75 fines 15	gneiss granitique	à mâchoires et à cônes	anguleuse et arrondie
D	5	fluvioglaciaire	gravier 50 sable 45 fines 5	gneiss granitique calcaire	à mâchoires	anguleuse
E	>3	fluvioglaciaire	gravier 30 sable 65 fines 5	gneiss granitique anorthosite volcaniques	à mâchoires	anguleuse
F	5	fluvioglaciaire	gravier 70 sable 25 fines 5	gneiss granitique anorthosite volcaniques	-	anguleuse
G	3	fluvioglaciaire	gravier 70 sable 25 fines 5	calcaire grès schiste	-	anguleuse et arrondie
H	9	fluvioglaciaire	gravier 50 sable 45 fines 5	grès granite schiste	à mâchoires	anguleuse
I	6	-	gravier 45 sable 45 fines 10	grès calcaire schiste	à cônes	anguleuse
J	19	-	gravier 50 sable 45 fines 5	grès calcaire schiste	à mâchoires et à cônes	anguleuse
K	3	fluvioglaciaire	gravier 60 sable 35 fines 5	calcaire grès conglomérat	-	arrondie
L	10	littorale	gravier 65 sable 30 fines 5	grès calcaire granite	à mâchoires et à cônes	anguleuse et arrondie

- Indéterminé

Source	Épaisseur du banc (m)	Origine du dépôt	Granulométrie (%)	Péetrographie	Concasseurs	Forme des particules
M	>5	fluvioglaciaire	gravier 45 sable 50 fines 5	grès calcaire quartzite	-	arrondie
N	9	proglaciaire	gravier 25 sable 55 fines 20	grès schiste shale, calcaire	à mâchoires	arrondie
O	>15	fluvioglaciaire complexe deltaïque	gravier 10 sable 85 fines 5	grès shale quartzite	gyratoire	arrondie
P	3	fluvioglaciaire contact de glace	gravier 40 sable 45 fines 15	schiste grès quartzite	à mâchoires	arrondie
Q	>8	fluvioglaciaire	gravier 70 sable 25 fines 5	gneiss granitique volcaniques	à cônes	anguleuse
R	>18	fluvioglaciaire moraine	gravier 70 sable 25 fines 5	gneiss granitique volcaniques	à cônes	anguleuse
S	5	fluvioglaciaire	gravier 50 sable 45 fines 5	gneiss granitique volcaniques grès	-	anguleuse

- Indéterminé



Gouvernement du Québec
**Ministère
des Transports**

Bibliothèque du Ministère des Transports



QTR A 037 935

93-04