



Englobe

Sols Matériaux Environnement



Association des constructeurs
de routes et grands travaux du Québec

ACRGQTQ



Regroupement professionnel
des producteurs de **granulats**

Programme d'essai sur le gros granulat à béton visant à vérifier le bien-fondé des notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1

Rapport final

Date : 21 Avril 2017

N/Réf. : 072-P-0009583-0-05-500-IM-R-0001-01

Le 21 Avril 2017

Monsieur Charles Abesque, ing. Ph.D.

Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec

Secteur technique

435, Grande Allée Est

Québec (Québec) G1R 2J5

Objet : *Programme d'essai sur le gros granulat à béton visant à vérifier le bien-fondé
des notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1*

Rapport final

N/Réf.: 072-P-0009583-0-05-500-IM-R-0001-01

Monsieur,

Nous avons le plaisir de vous transmettre ci-joint une copie de notre rapport final concernant le projet mentionné en référence.

Nous espérons que les informations contenues dans ce rapport sauront vous être utiles. Nous vous invitons à communiquer avec nous pour toute question concernant ce rapport.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

Englobe



François Santerre, ing.

Vice-président - Est du Québec

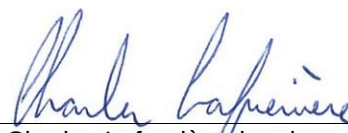


Programme d'essai sur le gros granulat à béton visant à vérifier le bien-fondé des notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1

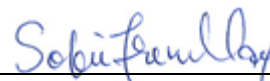
Rapport final

072-P-0009583-0-05-500-IM-R-0001-01

Préparé par :



Charles Lafrenière, ing. jr
Chargé de projet
N° de membre OIQ : 5056120



Sofie Tremblay, géo. M.Sc.
Chargée de projet
N° de membre OGQ : 1776

Approuvé par :



François Santerre, ing.
Vice-président - Est du Québec
Directeur de service Québec
N° de membre OIQ : 124799

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Mise en contexte	1
1.1.1	<i>Recensement des carrières</i>	<i>1</i>
1.1.2	<i>Carrières ayant recours aux notes</i>	<i>3</i>
1.1.3	<i>Vérification visuelle de l'état de différents ouvrages</i>	<i>7</i>
1.1.4	<i>Revue sommaire de la bibliographie</i>	<i>10</i>
1.2	Mandat	12
1.3	Programme de travail	13
2	TRAVAUX EN LABORATOIRE	15
2.1	Sélection des sites de granulats	15
2.2	Caractérisation des granulats	21
2.2.1	<i>Analyse pétrographique des granulats</i>	<i>21</i>
2.2.2	<i>Détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat</i>	<i>23</i>
2.3	Mélanges de béton et essais en laboratoire	24
2.3.1	<i>Résultats d'essais sur le béton à l'état plastique</i>	<i>25</i>
2.3.2	<i>Détermination de la résistance à la compression</i>	<i>27</i>
2.3.3	<i>Détermination des caractéristiques du réseau de vides d'air</i>	<i>28</i>
2.3.4	<i>Détermination de la résistance à l'écaillage</i>	<i>30</i>
2.3.5	<i>Résistance aux cycles de gel-dégel (ASTM C666 procédure A)</i>	<i>34</i>
3	CONCLUSION	36

TABLE DES MATIÈRES

Tableaux

Tableau 1 : Données fournies par 29 producteurs de granulats à béton.....	3
Tableau 2 : Données des 6 sites sélectionnés provenant des producteurs et caractéristiques des ouvrages identifiés	9
Tableau 3 : Évolution dans le temps des limites de la CSA A23.1 sur le micro-Deval et le gel-dégel non confiné.....	10
Tableau 4: Résultats au gel-dégel non confiné et au micro-Deval	16
Tableau 5 : Nature pétrographique des granulats	21
Tableau 6 : Densité et absorption du gros granulat (calibre 5-14 mm).....	23
Tableau 7 : Propriétés physiques des mélanges de béton à l'état plastique.....	26
Tableau 8 : Résistance à la compression	27
Tableau 9 : Caractéristiques du réseau de vides d'air	28
Tableau 10 : Résistance à l'écaillage.....	30
Tableau 11 : Barème d'interprétation des résultats de résistance à l'écaillage	31
Tableau 12 : Interprétation des résultats à l'écaillage	32
Tableau 13 : Résistance aux cycles de gel-dégel dans l'eau.....	34

Figures

Figure 1 : Limites des Basses-terres du St-Laurent	2
Figure 2 : Portrait global de la situation actuelle avec les notes 2 et 3 pour les 29 producteurs de pierre à béton	6
Figure 3 : Performance selon ICAR 507-1F 2006 des ouvrages en béton en services en fonction des valeurs au micro-Deval et de gel-dégel non confiné des gros granulats ayant servi à la fabrication de ce béton.	11
Figure 4 : Performance selon Rogers 1991 des ouvrages en béton en services en fonction des valeurs au micro-Deval et de gel-dégel non confiné des gros granulats ayant servi à la fabrication du béton.....	11
Figure 5 : Programme d'essais en laboratoire	14
Figure 6 : Résultats de l'essai au gel-dégel non confiné en fonction de l'essai au micro-Deval pour les sources de granulats produisant les calibres 5-14 mm (point de couleur bleu) et 10-20 mm (point de couleur rouge). Les résultats au micro-Deval sont une moyenne des résultats obtenus au laboratoire de Québec et de Lévis.	17
Figure 7 : Résultats de l'essai au gel-dégel non confiné en fonction de l'essai au micro-Deval pour les sites de granulats produisant le calibre 5-20 mm uniquement. Les résultats au micro-Deval sont une moyenne des résultats obtenus au laboratoire de Québec et de Lévis.....	18

TABLE DES MATIÈRES

Annexes

Annexe 1	Détails et photos des ouvrages visités
Annexe 2	Examen pétrographique des granulats
Annexe 3	Formulation des mélanges de béton
Annexe 4	Photographies des plaques de béton à l'essai d'écaillage (BNQ 2621-905/2012)
Annexe 5	Rapport détaillé au gel-dégel produit par l'Université de Sherbrooke
Annexe 6	Photographies des prismes de béton à l'essai de gel-dégel dans l'eau (ASTM C666)

Propriété et confidentialité

« Ce document d'ingénierie est la propriété d'Englobe Corp. et est protégé par la loi. Ce rapport est destiné exclusivement aux fins qui y sont mentionnées. Toute reproduction ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir préalablement obtenu l'autorisation écrite d'Englobe et de son Client.

Si des essais ont été effectués, les résultats de ces essais ne sont valides que pour l'échantillon décrit dans le présent rapport.

Les sous-traitants d'Englobe qui auraient réalisé des travaux au chantier ou en laboratoire sont dûment qualifiés selon la procédure relative à l'approvisionnement de notre manuel qualité. Pour toute information complémentaire ou de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec votre chargé de projet. »

REGISTRE DES RÉVISIONS ET ÉMISSIONS		
N° de révision	Date	Description de la modification et/ou de l'émission
0A	2016-12-09	Rapport pour commentaires – Partie Laboratoire
0B	2016-12-23	Rapport pour commentaires – Partie Laboratoire – Révision 01
0C	2017-01-09	Rapport pour commentaires – Partie Laboratoire – Révision 02
0D	2017-01-12	Rapport pour commentaires – Partie Laboratoire – Révision 03
0E	2017-03-03	Rapport préliminaire
00	2017-03-10	Rapport final
01	2017-04-21	Rapport final – Révision 01

1 INTRODUCTION

1.1 MISE EN CONTEXTE

Le Regroupement professionnel des producteurs de granulats (RPPG) soucieux de fournir un produit de qualité, a donc décidé sous l'égide de l'Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTO), de vérifier le bien-fondé des notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1, notes qui permettent respectivement un assouplissement sur l'essai de gel-dégel non confiné de 6 % à 9 % et sur l'essai de micro-Deval de 17 % à 19 % pour les calcaires et dolomies des Basses-terres du Saint-Laurent.

Pour ce faire, et afin d'être en mesure d'élaborer un éventuel programme d'essai en ce sens, il fallait tout d'abord avoir un portrait clair et global de la situation. C'est pourquoi le RPPG a procédé à la réalisation des différents éléments suivants :

- ▶ au recensement de l'ensemble des carrières situées dans les Basses-terres du Saint-Laurent qui exploitent des gros granulats destinés à la fabrication du béton;
- ▶ à la vérification, à partir des données des exploitants (gel-dégel non confiné, micro-Deval, nombre pétrographique, etc.), du nombre de carrières des Basses-terres du Saint-Laurent ayant recours aux notes pour pouvoir fournir leurs gros granulats;
- ▶ à la vérification visuelle de l'état de différents ouvrages (bordures et trottoirs) très exposés aux sels fondants âgés de 5 ans et plus et ayant été réalisés avec du béton contenant des gros granulats provenant de différents sites et ayant besoin ou non des notes;
- ▶ à la revue sommaire de la bibliographie.

1.1.1 Recensement des carrières

Les limites des Basses-terres du St-Laurent sont présentées à la Figure 1.

À partir des zones 7, 8, 9 et 10 correspondant aux Basses-terres du St-Laurent, du Répertoire des sources de granulats 2009 du RPPG, 34 entreprises ont été identifiées comme producteur de granulats exploitant dans les Basses-terres du St-Laurent. De ces 34 entreprises, 19 d'entre elles exploitent des sites qui ne fournissent pas de gros granulats à béton dont 1 se dit à l'extérieur de la zone concernée. Les 15 entreprises restantes exploitent quant à elles 28 sites se situant dans les Basses-terres du St-Laurent et produisent des gros granulats destinés à la fabrication de béton.

De plus, afin d'obtenir la meilleure information possible, nous avons également, à partir de l'activité 213 « Matériaux granulaires » du bottin des membres de l'ACRGTO 2015-2016, identifié les entreprises exploitant potentiellement dans les Basses-terres du St-Laurent, auxquelles ont été retranchées les entreprises situées dans les zones précédentes (7, 8, 9 et 10). De cette façon, 74 entreprises ont pu être répertoriées. De ce nombre, 20 d'entre elles ont indiqué exploiter des sites qui étaient à l'extérieur des Basses-terres du St-Laurent. Des 54 entreprises restantes, 1 entreprise a indiqué exploiter 1 site de gros granulats dans les Basses-terres du St-Laurent destinés à la fabrication de béton, et les 53 entreprises restantes n'ont pas répondu à notre sondage.

Au total, il a donc été recensé 29 sites qui exploitent des gros granulats destinés à la fabrication de béton dans les Basses-terres du St-Laurent.

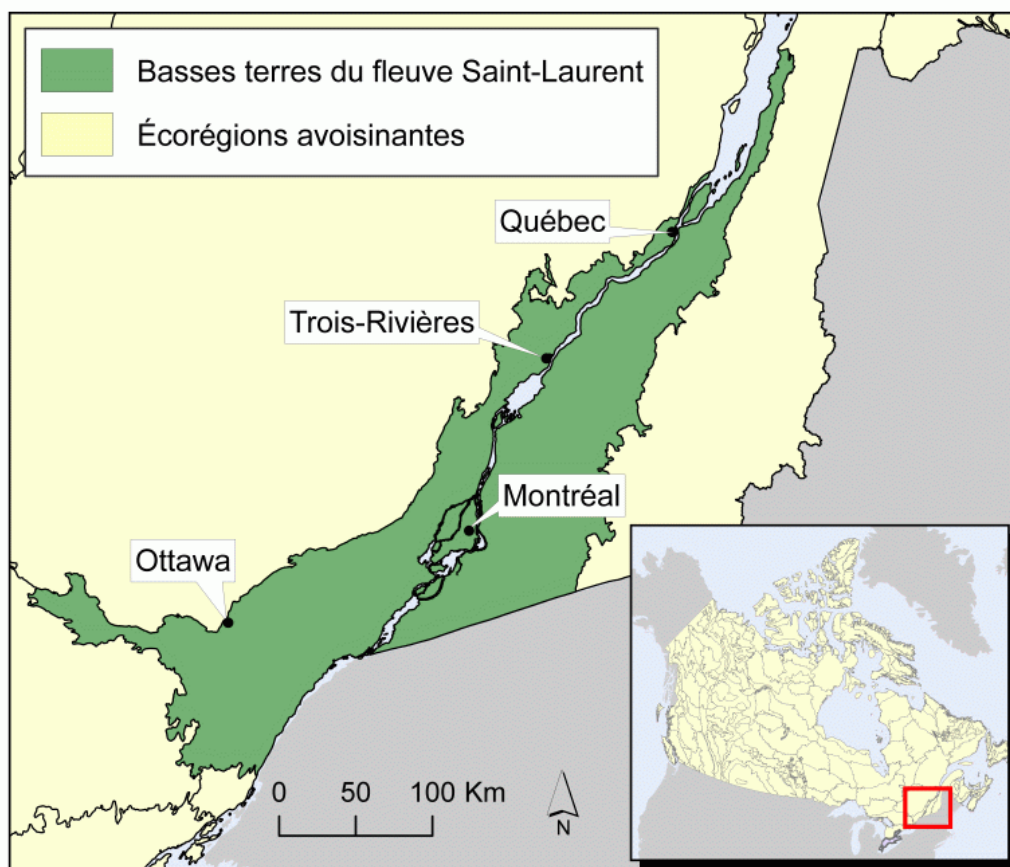


Figure 1 : Limites des Basses-terres du St-Laurent

1.1.2 Carrières ayant recours aux notes

Les caractéristiques (type de granulats, niveau de réactivité à la RAG et/ou au MgSO_4 , gel-dégel non confiné, micro-Deval de même que le nombre pétrographique des gros granulats), fournies en 2015 par les exploitants des gros granulats des 29 sites identifiés précédemment sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1 : Données fournies par 29 producteurs de granulats à béton

Site	Type de granulats	RAG / MgSO ₄ (%)	micro-Deval (%)				Gel-dégel non confiné Par calibre (%)		Nombre pétrographique
			CSA A23.2-29A						
			5-10 mm	10-14 mm	14-20 mm	Moy.	CSA A23.2-24A	Moy.	CSA A23.2-15A
1	N/A	Non réactif/ N/A	2,5-10 7,8	5-14 9,2	10-20 10,0	9	1,0 - 1,4 - 1,8	1,4	100
2	N/A	Non réactif/ 1 à 1,7	5-10 8,3	5-14 8,9	10-20 7,6	8,3	0,8 - 1,1 - 2,3	1,4	
3	Dolomie	Non réactif/ 2,7	LC-2170 (%)				1,8	1,8	102
			6,2	8,1	7,0				
4	Syénite	Non réactif/ N/A			5-20 4,2	4,2	0,4	0,4	100
5	Dolomie	Non réactif/ 1,7 à 6,7	7,8	7,7	7,9	7,8	7,0 - 6,4 - 3,9	5,8	103
6	Calcaire	Très réactif/ 5,23			5-20 13,8	13,8	2,6	2,6	100
7	Calcaire	Non réactif/ N/A	9,6	9,1	9,3	9,3	2,0	2,0	111
8	Calcaire	Non réactif/ 1,0	5-14 11,0	5-20 12,0		11,5	1,5	1,5	N/D
9	Calcaire	Non réactif/ 1,5 à 9	5-14 9,0	5-20 15,0	10-20 13,0	12,3	3,7	3,7	N/D

Site	Type de granulats	RAG / MgSO ₄ (%)	micro-Deval (%)				Gel-dégel non confiné Par calibre (%)		Nombre pétrographique
			CSA A23.2-29A						
			5-10 mm	10-14 mm	14-20 mm	Moy.	CSA A23.2-24A	Moy.	CSA A23.2-15A
10	Dolomie	Non réactif/ N/A	5-14 11,0	5-20 15,0		13,0	2,5	2,5	N/D
11	Calcaire	Non réactif/ 10,4 à 2,4	9,3	9,9	10-20 9,6	9,6	2,8 - 1,9 - 1,1	1,9	103
12	Dolomie	Non réactif/ N/D	2,5-10 7,5	10-20 6,8		7,2	1,7	1,7	100
13	Dolomie	Non réactif/ N/D	2,5-10 8,3			8,3	1,5	1,5	100
14	Calcaire	Non réactif/ 4,4	9,0	14,0	15,0	12,7	3,4	3,4	111
15	Dolomie	Non réactif/ 0,3	6,1	6,0	5,7	5,9	1,8	1,8	108
16	Dolomie	Non réactif/ N/D	3,0	6,0		4,5			110
17	Calcaire	Non réactif/ 2,5 à 4,9	2,5-10 15,6	5-14 15,3	10-20 15,1	15,3	6,9 - 5,7 - 5,1	5,9	103
18	Dolomie	Non réactif/ 0,2 à 0,6		5-14 10,1	10-20 10,2	10,2	- 1,3 - 0,8	1,1	
19	Syénite	Non réactif/ 0,0 à 0,2	2,5-10 3,2	5-14 1,3	10-20 1,9	2,1	0,7 - 0,8 - 0,2	0,6	100
20	Syénite	Non réactif/ 0,8		5-14 10,4		10,4	5,7	5,7	111

Site	Type de granulats	RAG / MgSO ₄ (%)	micro-Deval (%)				Gel-dégel non confiné Par calibre (%)		Nombre pétrographique
			CSA A23.2-29A						
			5-10 mm	10-14 mm	14-20 mm	Moy.	CSA A23.2-24A	Moy.	CSA A23.2-15A
21	Calcaire	N/D / N/D		5-14 18,6	5-20 19,5	19,1	0,8	0,8	100
22	Calcaire	N/D / N/D		5-14 18,1	10-20 18,1	18,1	1,2	1,2	102
23	N/D	N/D / N/D	19,0			19,0	8,0	8,0	N/D
24	N/D	N/D / N/D	17,0			17,0	9,0	9,0	N/D
25	Calcaire	N/D / N/D	19,0	13,4	16,4	16,3	9,1 - 6,7 – 4,9	6,9	123
26	Basalte	Non réactif/ 3,8 à 4,9	7,5			7,5	5,4 à 9,9	7,7	100
27	Basalte	Non réactif/ 10,7	7,8	9,6	9,0	8,8	5,1 - 6,5 - 5,1	5,6	100
28	Calcaire	Très réactif/ 3,8			16,6	16,6	5,4	5,4	100
29	Calcaire	Ext. réactif/ 2,4	13,5		5-20 14,5	14	3,2	3,2	118

Note 1 : Les valeurs en vert représentent les résultats qui respectent les exigences du Tableau 12 sans les notes 2 et 3. Les valeurs en jaune représentent les résultats qui respectent les exigences du Tableau 12 avec les notes 2 et 3, et les valeurs en rouge représentent les résultats qui, même avec les notes 2 et 3, ne respectent pas les exigences du Tableau 12.

En combinant les résultats obtenus de gel-dégel non confinés et de micro-Deval du Tableau 1, un graphique tel que présenté à la Figure 2 permet de tracer un portrait global de la situation concernant les critères d'acceptation des granulats avec ou sans les notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1. Les zones de couleur représentent les cas suivants :

- ▶ Zone verte : Le granulat respecte les exigences du Tableau 12 sans les notes 2 et 3.
- ▶ Zone jaune : Le granulat respecte les exigences du Tableau 12 avec les notes 2 et 3.
- ▶ Zone rouge : Le granulat ne respecte pas les exigences du Tableau 12, et ce, même avec les notes 2 et 3.

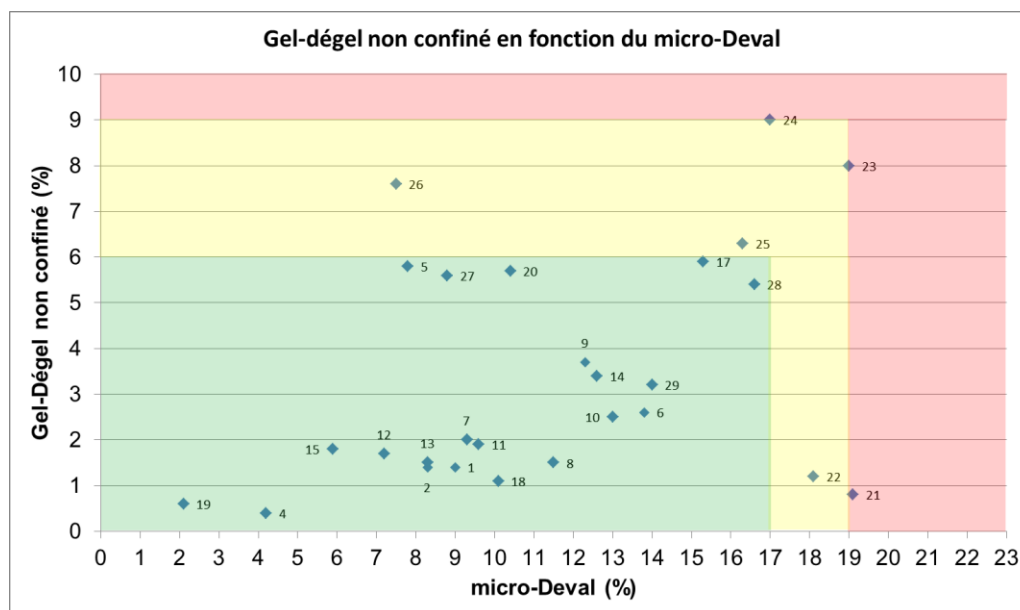


Figure 2 : Portrait global de la situation actuelle avec les notes 2 et 3 pour les 29 producteurs de pierre à béton

Il est à noter que les sites no.3 et no.16 n'ont pas été reportés sur la Figure 2 étant donné que nous n'avons pas été en mesure d'obtenir respectivement les résultats au micro-Deval selon la CSA A23.2-29A et au gel-dégel non confiné. De plus, le site no.4 ne produit pas actuellement de gros granulats à béton mais prévoit en produire à plus ou moins long terme. Les sites no.6, no.28 et no.29 présentent des niveaux de réactivité alcalis granulats (RAG) qui varient de très élevés à extrêmement élevés. En conséquence, les 6 sites précédemment mentionnés (no.3, no.4, no.6, no.16, no.28 et no.29) ne feront pas partie des sites susceptibles d'être retenus dans le cadre de notre projet de recherche.

Sur la base de ces informations, cela nous indique qu'il y a 6 sites (no.21, no.22, no.23, no.24, no.25 et no.26) de ces 29 sites qui ont recours à l'une et/ou l'autre des notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 pour être en mesure de produire des gros granulats destinés à la fabrication du béton, soit 21% des sites répertoriés.

En plus, 5 sites (no.5, no.17, no.20, no.27 et no.28) des 23 sites restants sont limitrophes sur les limites du micro-Deval et/ou du gel-dégel non confiné sans les deux notes, soit 17% des sites répertoriés.

Soit un potentiel d'environ 38% des sites (11 sites des 29 sites) des Basses-terres du St-Laurent produisant des gros granulats, destinés à la fabrication du béton, qui ont besoin des notes 2 et/ou 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 pour être en mesure d'exploiter des granulats destinés à la fabrication du béton.

1.1.3 Vérification visuelle de l'état de différents ouvrages

Maintenant que la présence des notes 2 et 3 a été identifiée comme extrêmement importante pour l'industrie des granulats, nous allons vérifier si l'utilisation de ces notes est susceptible d'affecter la durabilité des ouvrages de béton en service (in situ), et ce, afin de nous conforter dans notre démarche avant d'élaborer et de lancer un programme d'essai en laboratoire.

Avant de procéder à la sélection des ouvrages qui seront soumis à une inspection visuelle, il faut tout d'abord savoir que plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur la durabilité des ouvrages. Voici une liste non exhaustive de ces facteurs :

- ▶ Année de construction;
- ▶ Période de construction (saisons);
- ▶ Formulation du béton (résistance à la compression, type de ciment, facteur d'espacement, ajouts cimentaires, etc.);
- ▶ Caractéristiques réelles des granulats;
- ▶ Ajout potentiel d'eau en chantier;
- ▶ Mise en place et mûrissement du béton;
- ▶ Nature et taux d'épandage des sels déglçants;
- ▶ Nombre de cycles de gel-dégel subits;
- ▶ Etc.

Afin de faciliter les inspections tout en ayant des ouvrages fortement sollicités (sels déglçants, surface horizontale), le choix s'est porté essentiellement sur **des trottoirs et des bordures**.

Par contre, étant donné le fait que la classe d'exposition F-2 (Béton soumis au gel-dégel, en condition non saturée, mais non exposé aux chlorures) n'est pas incluse dans les notes et qu'elle devrait l'être, vu le fait qu'elle est moins sévèrement exposée que la classe F-1 (béton soumis au gel-dégel, en condition saturée, mais non exposé aux chlorures) qui elle est incluse dans les notes, des fondations extérieures touchées par cette classe d'exposition (F-2) ont également été visitées afin de prouver leurs bonnes performances.

Les ouvrages sélectionnés ont été identifiés à partir de 6 sites. La sélection des sites s'est faite d'une part à partir de ceux qui ont potentiellement besoin des notes 2 et/ou 3 pour exploiter, et d'autre part à partir de ceux qui étaient en mesure de retracer l'information sur l'emplacement des ouvrages réalisés, soit directement ou via les fournisseurs de béton à qui les granulats sont vendus. De plus, les ouvrages devaient avoir un minimum de 5 ans d'âge, et être exposés ou très exposés aux sels déglçants.

Cette façon de faire va permettre d'avoir des ouvrages exposés ayant déjà un certain vécu, ce qui permettra de voir rapidement si les assouplissements, que permettent les deux notes, sont conséquents d'une dégradation ou non du béton. Il est pris pour acquis que les ouvrages réalisés à partir de granulats n'ayant pas recours aux notes sont durables et performants.

Les sites sélectionnés, les caractéristiques des granulats qui proviennent de ces sites (voir Tableau 1) de même que les ouvrages qui ont été identifiés pour fin d'inspection visuelle sont présentés au Tableau 2.

Les détails et photos des ouvrages visités sont présentés à l'Annexe 1.

Les observations visuelles réalisées conjointement sur le terrain par Yves Dénommé, ing., M.Sc.A. de l'Association béton Québec (ABQ) et par Charles Abesque ing., Ph.D. de l'ACRGQTQ ont démontré, de façon générale, la bonne performance des ouvrages [peu d'écaillage de la pâte cimentaire, très peu de cônes d'éclatement et le plus souvent quasi-absence de ces cônes d'éclatement] ayant été fabriqués avec du béton contenant aussi bien des gros granulats ayant besoin des notes (sites : no.21, no.24 et no.25) que ceux n'ayant pas besoin des notes (sites : no.5, no.17 et no.28) mais limitrophes aux exigences.

C'est ainsi qu'à la lumière de l'ensemble des informations recueillies précédemment (impact majeur du retrait des notes pour l'industrie menant à la fermeture potentielle de plus de 38% des sites fournissant des gros granulats pour la fabrication du béton, et ce, malgré une performance adéquate des ouvrages) que l'industrie, confortée dans sa démarche, a lancé un programme d'essai en laboratoire ayant pour objectif de valider la pertinence des notes du Tableau 12 de la norme CSA 23.1. Le programme d'essai a été élaboré par l'ACRGQTQ en collaboration avec les experts du domaine et confié à la firme Englobe Corp. pour fin de réalisation.

Tableau 2 : Données des 6 sites sélectionnés provenant des producteurs et caractéristiques des ouvrages identifiés

Site	Type de granulats	RAG / MgSO ₄ (%)	micro-Deval (%)	Gel-dégel non confiné (%)	Nombre pétrographique	Ouvrage identifié	
			CSA A23.2-29A	CSA A23.2-24A	CSA A23.2-15A	Type	f _c (MPa)
5	Dolomie	Non réactif/ 1,7 à 6,7	7,8	5,8	103	Trottoir #1	35
						Trottoir #2	35
17	Calcaire	Non réactif/ 2,5 à 4,9	15,3	5,9	103	Trottoir #1	~35
						Trottoir #2	~35
						Piste cyclable #3	~35
21	Calcaire	N/D / N/D	19,1	0,8	100	Trottoir #1	35
						Trottoir #2	35
						Bordure #3	35
24	N/D	N/D / N/D	17,0	9,0	N/D	Trottoir #1	35
						Trottoir #2	35
						Trottoir #3	35
25	Calcaire	N/D / N/D	16,3	6,9	123	Trottoir #1	35
						Trottoir #2	35
						Trottoir #3	35
						Trottoir #4	32
28	Calcaire	Très réactif/ 3,8	16,6	5,4	100	Murs de fondation #1	25 à 30
						Murs de fondation #2	

Note 1 : Les valeurs en vert représentent les résultats qui respectent les exigences du Tableau 12 sans les notes 2 et 3. Les valeurs en jaune représentent les résultats qui respectent les exigences du Tableau 12 avec les notes 2 et 3, et les valeurs en rouge représentent les résultats qui, même avec les notes 2 et 3, ne respectent pas les exigences du Tableau 12.

1.1.4 Revue sommaire de la bibliographie

L'évolution dans le temps des limites autorisées par la CSA A23.1 sur le gel-dégel non confiné et le micro-Deval est présentée au Tableau 3.

Tableau 3 : Évolution dans le temps des limites de la CSA A23.1 sur le micro-Deval et le gel-dégel non confiné

Version CSA	micro-Deval (%)		Gel-dégel non confiné (%)	
	†Soumis gel-dégel	Autres expositions	†Soumis gel-dégel	Autres expositions
1994	Pas d'exigence		±6	±10
2000	±14	±17	±6	±10
2004	17	17	6	10
2009	17	21	6	10
2014	17	21	6	10

†: 2000, F-1, C-1 et C-2

‡: Autres exigences

2004 : Introduction de la note 2 sur le gel-dégel non confiné (9 plutôt que 6 si soumis au gel-dégel et 13 plutôt que 10 si autres expositions)

2009 : Introduction de la note 3 sur le micro-Deval (19 plutôt que 17 si soumis au gel-dégel)

L'étude de 2006 financée par «Aggregates Foundation for Technology, Research and Education, ICAR 507-1F » avait pour objectif de vérifier si l'essai de micro-Deval, seul ou conjugué à un autre essai, permettait de déterminer s'il y avait une corrélation entre la performance des granulats dans le béton sur le terrain versus les essais de laboratoire.

Cette étude a permis de mettre en perspective les relations entre les valeurs au micro-Deval et au gel-dégel non confiné des gros granulats versus la performance des ouvrages de béton en services (Figure 3).

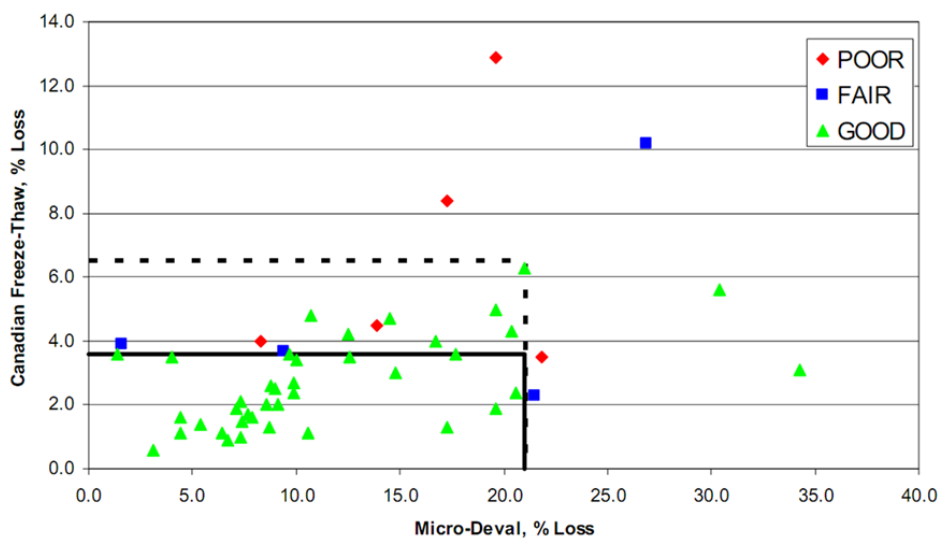


Figure 3 : Performance selon ICAR 507-1F 2006 des ouvrages en béton en services en fonction des valeurs au micro-Deval et de gel-dégel non confiné des gros granulats ayant servi à la fabrication de ce béton.

L'étude de 1991 de Rogers « Laboratory Tests for Predicting Coarse Aggregate Performance in Ontario » indique elle aussi la relation entre la performance des granulats en service ayant servi à la fabrication des bétons versus les essais de laboratoire (Figure 4).

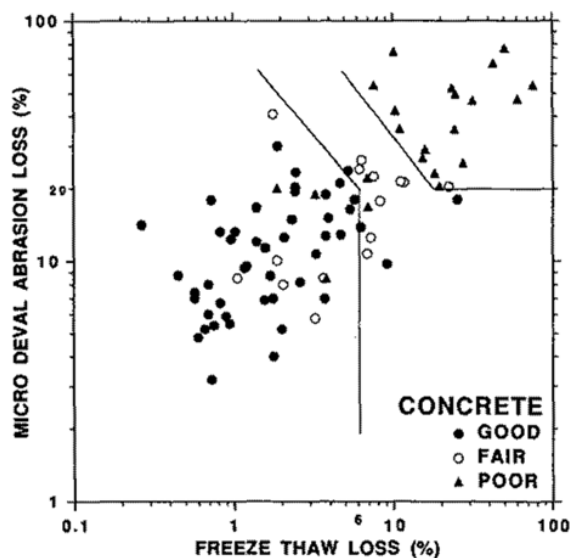


Figure 4 : Performance selon Rogers 1991 des ouvrages en béton en services en fonction des valeurs au micro-Deval et de gel-dégel non confiné des gros granulats ayant servi à la fabrication du béton.

Ces graphiques indiquent que la performance en service des ouvrages en béton ayant été conçus avec des gros granulats ayant des valeurs au micro-Deval allant jusqu'à 21 et des valeurs au gel-dégel non confiné allant jusqu'à 6,2 donnent des ouvrages performants (GOOD). Ces graphiques indiquent néanmoins que des ouvrages performants peuvent également être fabriqués avec des valeurs au micro-Deval et au gel-dégel non confiné supérieures à celles qui viennent d'être présentées.

1.2 MANDAT

Les services d'Englobe Corp. ont été retenus par l'**Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec** afin de réaliser un programme d'essai sur le gros grulatat à béton visant à vérifier la pertinence des notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1-14.

Lors de la prochaine révision de la norme CSA A23.1, un retrait de ces notes par les membres du comité de révision de la norme a été évoqué. En conséquence, le Regroupement professionnel des producteurs de granulats (RPPG), sous l'égide de l'ACRGTO, a demandé la réalisation d'un programme d'essai ayant comme objectif de vérifier le bien-fondé du retrait de ces notes.

Suite à la consultation de divers experts du domaine [membres réviseurs de l'Association canadienne de normalisation (CSA), laboratoires, Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports (MTMDT), enseignants universitaires, représentants techniques des villes, etc.], un programme d'essai en laboratoire a été élaboré par l'ACRGTO et présenté à la firme Englobe Corp. pour fin de réalisation.

Le programme a consisté à réaliser des essais de caractérisation sur des sources de granulats préalablement sélectionnées. La performance de différents bétons confectionnés à partir de ces granulats a par la suite été évaluée par l'entremise d'essais de performance en durabilité réalisés en laboratoire. L'ensemble des résultats permettra de statuer sur la qualité de ces granulats utilisés dans des bétons de classe d'exposition F-1, C-XL, C-1 et C-2 dans la mesure où ces granulats ont recours aux notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1-14.

1.3 PROGRAMME DE TRAVAIL

Tel que mentionné précédemment, le présent programme d'essai a été élaboré par l'ACRGTO suite à la consultation de divers experts du domaine [membres réviseurs de l'Association canadienne de normalisation (CSA), laboratoires, Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports (MTMDET), enseignants universitaires, représentants techniques des villes, etc.].

Ce programme d'essai a consisté à réaliser des essais de caractérisation sur différentes sources de granulats, puis de procéder à la confection de mélanges de béton à partir de ces granulats afin d'évaluer leur performance en durabilité. Dans ce contexte, les essais suivants ont été réalisés sur les granulats :

- Détermination de la résistance à la dégradation du gros granulat par abrasion dans l'appareil micro-Deval selon la norme CSA A23.2-29A;
- Détermination de la résistance au gel et au dégel du gros granulat non confiné selon la norme CSA A23.2-24A;
- Détermination de la densité et absorption du gros granulat selon la norme CSA A23.2-12A;
- Analyse pétrographique des granulats selon la norme CSA A23.2-15A (méthode A).

Les essais suivants ont également été réalisés sur les bétons fabriqués à partir des différents granulats :

- Détermination de la résistance à la compression selon la norme CSA A23.2-9C;
- Détermination des caractéristiques du réseau de vides d'air selon la norme ASTM C457;
- Détermination de la résistance à l'écaillage selon la norme BNQ 2621-905/2012;
- Détermination de la résistance aux cycles de gel et dégel selon la norme ASTM C666 (procédure A – gel et dégel dans l'eau).

La Figure 5 (page suivante) présente le programme d'essai sous la forme d'un organigramme permettant d'apprécier visuellement les différentes étapes du programme, telles que la sélection des granulats, les essais de caractérisation et les essais de performance et de durabilité.

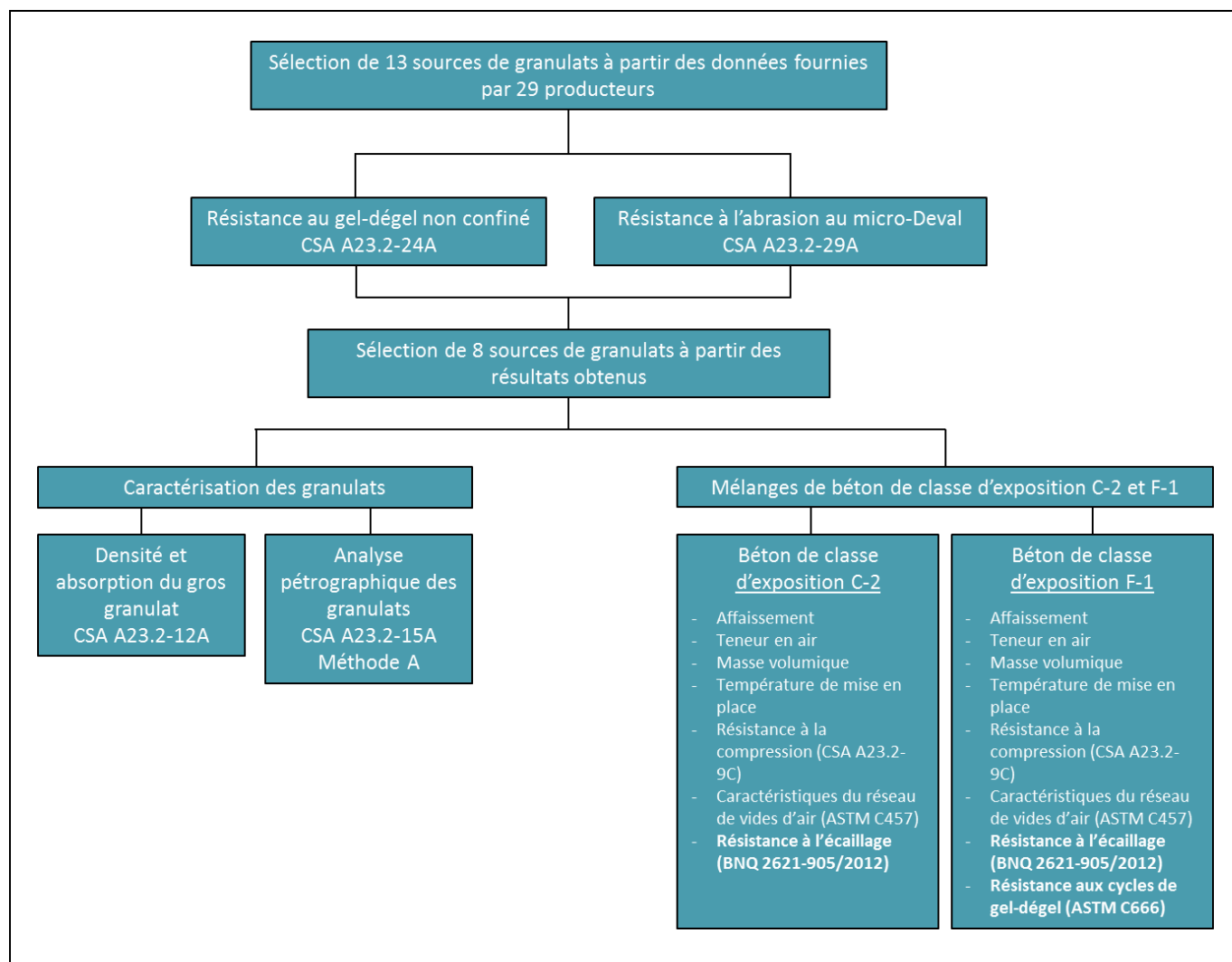


Figure 5 : Programme d'essais en laboratoire

2 TRAVAUX EN LABORATOIRE

2.1 SÉLECTION DES SITES DE GRANULATS

Pour mettre en évidence la pertinence des notes 2 et 3 du Tableau 12, il a été décidé, dans un premier temps, de procéder à la sélection des granulats qui serviront pour ce programme d'essai. La sélection des granulats a été réalisée en fonction des résultats obtenus au gel-dégel non confiné et au micro-Deval pour 29 producteurs de granulats à béton. Ceux-ci sont majoritairement situés dans la région des Basses-terres du Saint-Laurent et produisent, pour la plupart, des calcaires et des dolomies. L'ensemble des données fournies par les 29 producteurs de granulats à béton ont déjà été présentées au Tableau 1 et Figure 2 aux pages précédentes.

À partir de ces données fournies par les producteurs et afin de respecter les délais de réalisation impartis de même que les contraintes budgétaires, il a été décidé que le programme de recherche serait fait à partir de 8 des 23 sites restants. En effet, les 6 sites suivants : no.3, no.4, no.6, no.16, no.28 et no.29 précédemment identifiés, ne peuvent être sélectionnés pour les raisons mentionnées antérieurement.

Les essais de gel-dégel non confiné et de micro-Deval seront refaits par Englobe Corp. sur l'ensemble des sites retenus. Cette étape étant nécessaire afin de vérifier si ces caractéristiques ont variés depuis les derniers résultats disponibles. De plus, comme l'essai au micro-Deval est considéré comme pouvant donner des résultats variables, ce dernier sera fait en double et réalisé par le laboratoire d'Englobe à Lévis, et ce, dans le but de vérifier la variabilité inter-laboratoire et afin de ne pas retenir une source qui aurait présentée des différences significatives.

C'est pourquoi, nous avons préféré sélectionnés plus de sites que nécessaire, soit 13 sites, afin d'être en mesure de mettre de côté les sites qui présenteraient des variations trop importante au niveau du micro-Deval ou pour toute autre raison. Il était donc important que chacune des zones illustrées à la Figure 2 soient représentées lors du choix des 13 sites.

Les résultats des 13 sites de granulats sélectionnés sont présentés au Tableau 4. C'est résultats ont permis de guider le choix des 8 sites de granulats qui ont été retenues pour la poursuite du programme d'essai.

Tableau 4: Résultats au gel-dégel non confiné et au micro-Deval

Site	Calibre	Gel-dégel non confiné (%)	micro-Deval (Québec) (%)	micro-Deval (Lévis) (%)	micro-Deval <u>Moyenne</u> (%)
5	5-14 mm	5,4	8,5	9,3	8,9
	10-20 mm	4,2	8,7	9,0	8,9
9	5-20 mm	5,2	18,9	19,0	19,0
11	5-14 mm	5,6	9,1	8,6	8,9
	10-20 mm	4,0	7,8	8,2	8,0
14	5-14 mm	7,0	17,6	15,6	16,6
	10-20 mm	2,8	12,3	13,7	13,0
17	5-14 mm	6,8	15,0	17,0	16,0
	10-20 mm	4,7	15,4	16,1	15,8
19	5-14 mm	0,8	2,6	2,6	2,6
21	5-14 mm	0,4	17,9	20,0	19,0
	10-20 mm	0,6	18,3	30,6	24,5
22	5-14 mm	0,7	17,4	19,7	18,6
	10-20 mm	0,4	18,1	18,9	18,5
23	5-14 mm	5,2	20,8	22,4	21,6
	10-20 mm	2,0	19,5	22,4	21,0
24	5-20 mm	5,5	14,3	14,4	14,4
25	5-20 mm	3,4	19,0	19,9	19,5
26	5-14 mm	4,2	7,7	8,0	7,9
	10-20 mm	5,4	8,8	8,6	8,7
27	5-20 mm	4,4	9,0	8,5	8,8

Note 1 : Les valeurs en vert représentent les résultats qui respectent les exigences du Tableau 12 sans les notes 2 et 3. Les valeurs en jaune représentent les résultats qui respectent les exigences du Tableau 12 avec les notes 2 et 3, et les valeurs en rouge représentent les résultats qui, même avec les notes 2 et 3, ne respectent pas les exigences du Tableau 12.

Note 2 : La pierre témoin utilisée pour valider les essais est la pierre Brechin Drain Brothers provenant de la carrière de Stoney Lake. L'exigence pour la perte pondérée de la pierre témoin doit se retrouver dans l'intervalle 11,4 % à 14,8 % à l'essai au micro-Deval et dans l'intervalle 8,5 % à 15,3 % au gel-dégel non confiné. Pour l'essai au micro-Deval, des pertes de 13,5 % (sites 9-14-17-21-22-23), de 13,8 % (sites 5-11-24-25), de 15,0 % (sites 26-27) et de 14,1 % (site no.19) ont été obtenues. Pour l'essai au gel-dégel non confiné, des pertes de 11,5 % (sites 5-11-25), de 11,3 % (sites 9-22-23-24), de 14,1 % (sites 26-27) et de 13,6 % (sites 14-17-21) ont été obtenues.

L'objectif du programme d'essai étant de vérifier le bien-fondé des notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1, il était donc important que chacune des zones illustrées à la Figure 2 soient représentées lors de la sélection des 8 sites pour la suite du programme. Les résultats du Tableau 4 ont alors été mis en graphique afin de situer les 13 sites de granulats en fonction des critères de qualification. La Figure 6 présente

les résultats obtenus pour les sites produisant des calibres 5-14 mm et 10-20 mm, tandis que la Figure 7 présente les résultats obtenus pour les sites qui produisent un calibre 5-20 mm.

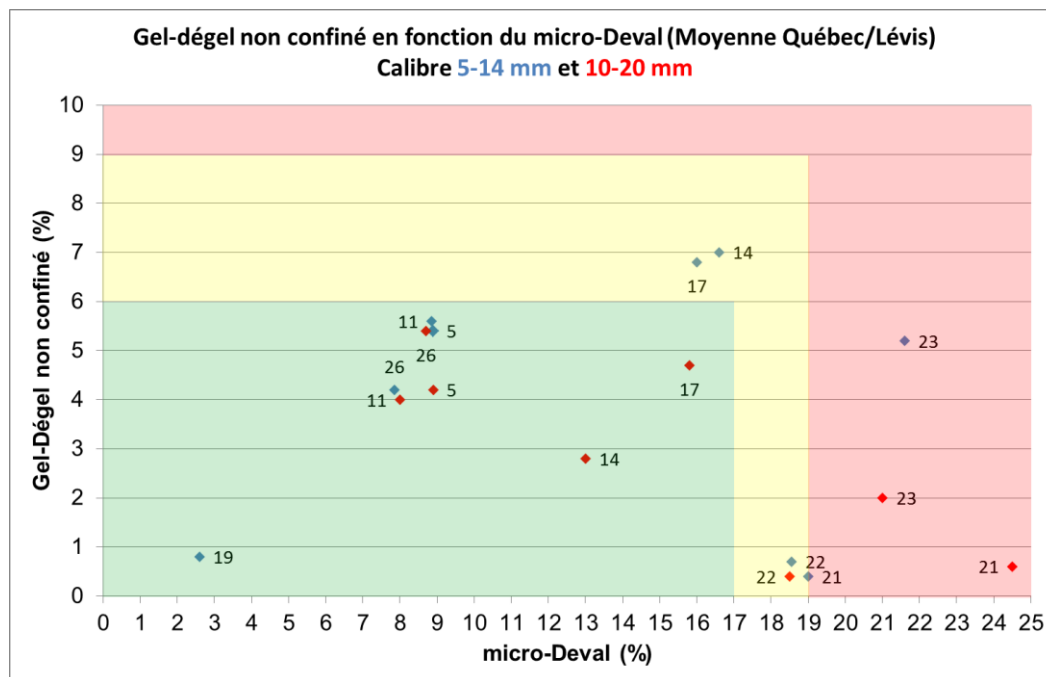


Figure 6 : Résultats de l'essai au gel-dégel non confiné en fonction de l'essai au micro-Deval pour les sources de granulats produisant les calibres 5-14 mm (point de couleur bleu) et 10-20 mm (point de couleur rouge). Les résultats au micro-Deval sont une moyenne des résultats obtenus au laboratoire de Québec et de Lévis.

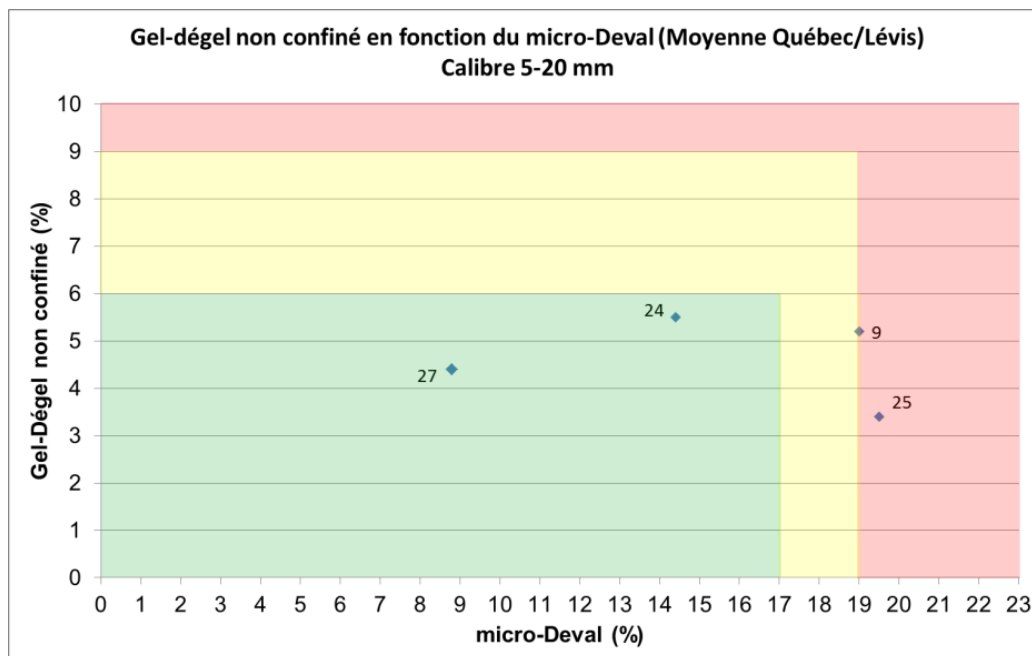


Figure 7 : Résultats de l'essai au gel-dégel non confiné en fonction de l'essai au micro-Deval pour les sites de granulats produisant le calibre 5-20 mm uniquement. Les résultats au micro-Deval sont une moyenne des résultats obtenus au laboratoire de Québec et de Lévis.

Les résultats présentés aux Figures 6 et 7 montrent, contrairement aux données de 2015, qu'aucun résultat ne se situe dans l'intervalle de valeurs permises par la note 2 (i.e. 6 % à 9 %) à l'essai de gel-dégel non confiné pour les sites qui produisent du calibre 10-20 mm et celles qui produisent du calibre 5-20 mm uniquement. Concernant la note 3, encadrant les résultats au micro-Deval, deux sites se retrouvent entre les valeurs de 17 % et 19 %, soit les résultats obtenus pour les granulats de calibre 5-14 mm du site no.21 et ceux de calibre 5-14 mm et 10-20 mm du site no.22. Les granulats de calibre 5-20 mm du site no.9 se situent également sur la limite supérieure au micro-Deval.

La Figure 6 permet aussi de remarquer que le calibre 5-14 mm de plusieurs sites de granulats est le plus susceptible d'être touché par le retrait des notes 2 et 3. En effet, les granulats provenant des sites no.14 et no.17 ont recours à l'assouplissement de la limite permise au gel-dégel non confiné afin de pouvoir utiliser leurs granulats dans des bétons de classe d'exposition F-1, C-XL, C-1 et C-2. Cette observation démontre que les notes sont davantage requises pour le calibre 5-14 mm, car les résultats suggèrent que ce calibre est moins performant au gel-dégel non confiné et au micro-Deval comparativement aux autres calibres. Ces résultats s'expliquent par le fait que lors des opérations de concassage des granulats, les plus petits calibres représentent

normalement la partie la moins résistante de la pierre brute, soit celle qui se fracture en premier. Il faut aussi comprendre que cette observation ne s'applique pas nécessairement à tous les types de granulat étant donné que d'autres facteurs tels que la dureté, la composition minéralogique et la présence d'impuretés ou de minéraux argileux peuvent influencer sur la qualité des granulats.

Afin de pouvoir comparer la performance des granulats dans le béton, il a donc été décidé de sélectionner les 8 sites parmi les sites qui sont le plus susceptible d'avoir recours aux notes, soit les sites qui produisent des granulats de calibre 5-14 mm. De plus, pour limiter le nombre de variables à étudier, l'ensemble des gâchées de béton ont été réalisées qu'avec ce calibre uniquement, éliminant du même coup les sites qui ne produisent uniquement que des granulats de calibre 5-20 mm, soit les sites no.9, no.24, no.25 et no.27. Le site no.21 a également été écarté, car une grande variabilité a été observée entre les résultats obtenus au micro-Deval au laboratoire de Lévis et celui de Québec, mais ce uniquement sur le calibre 10-20 mm et non sur le calibre 5-14 mm. La sélection finale des 8 sites s'est donc imposée d'elle-même étant donné qu'après le retrait des 5 sites (no.9, no.21, no.24, no.25 et no.27), mentionnées ci-dessus, il ne restait que 8 sites possible parmi les 13 sites pouvant être sélectionnées.

Les 8 sites de granulats qui ont donc été retenues pour la suite du programme d'essai sont les sites no.5, no.11, no.14, no.17, no.19, no.22, no.23 et no.26. Il est important de mentionner que chacune des zones présentées à la Figure 2 est représentée par au moins un site de granulats parmi les 8 sites retenus. Les 8 sites retenus se retrouvent dans les situations suivantes :

- ▶ Les sites no.5, no.11, no.19 et no.26 produisent des granulats de calibre 5-14 mm qui respectent les exigences du Tableau 12 sans les notes 2 et 3. Le site no.19 est utilisé comme pierre témoin pour ce programme d'essai, car les granulats de cette source ont une très bonne performance au gel-dégel non confiné et au micro-Deval.
- ▶ Les sites no.14 et no.17 sont des exemples où les granulats peuvent être utilisés dans des bétons de classe F-1, C-XL, C-1 et C-2, car ils respectent l'exigence au micro-Deval sans la note 3. Toutefois, pour être utilisés, ils ont recours à la note 2 qui permet un assouplissement de la limite permise au gel-dégel non confiné.
- ▶ Le site no.22 représente le cas où les granulats respectent l'exigence au gel-dégel non confiné sans la note 2 et que leur utilisation est acceptée au micro-Deval en ayant recours à la note 3.

- ▶ Le site no.23 produit des granulats de calibre 5-14 mm qui ne respectent pas les exigences du Tableau 12, au niveau du micro-Deval et ce malgré la présence de la note 3.

2.2 CARACTÉRISATION DES GRANULATS

Des essais complémentaires ont été réalisés afin de caractériser les sites de granulats retenus. Ces essais comprenaient une analyse pétrographique des granulats ainsi qu'une détermination de la densité et de l'absorption des granulats pour chacune des sites. Les résultats d'essai sont présentés dans les prochaines sections.

2.2.1 Analyse pétrographique des granulats

Pour les 8 sites de granulats retenus, une analyse pétrographique des granulats a été réalisée selon la méthode A de la norme CSA A23.2-15A. Pour compléter l'analyse, deux (2) lames minces ont été fabriquées et analysées. Les résultats détaillés des analyses pétrographiques sont présentés à l'Annexe 2. Le Tableau 5 résume les principales observations réalisées. Il faut noter que la pétrographie d'un site peut varier à l'intérieur d'une même carrière et que l'analyse pétrographique est fonction de la provenance du granulats.

Tableau 5 : Nature pétrographique des granulats

Site	Nature pétrographique	Nombre Pétrographique (NP) ¹	Composition minéralogique
5	Dolomie calcitique ²	129	50 % dolomite, 30 % calcite, 5-10 % minéraux opaques (pyrite et oxydes de fer)
11	Calclutite ²	105	70 % calcite, 30 % dolomite, 2-5 % minéraux opaques (pyrite et oxydes de fer)
14	Calclutite fossilifère ²	106	Fragments de fossiles dans une matrice carbonatée à grains fins (micritique) et présence de dolomie cristalline, 5-10 % minéraux opaques (pyrite uniquement)
17	Dolomie calcitique ²	106	85 % dolomite, 10 % clastes carbonatés, 1-5 % minéraux opaques (pyrite et oxydes de fer)
19	Basalte	100	70-80 % plagioclase, 10-15 % pyroxène, 5 % olivine, 1 % minéraux opaques (trace de pyrite et oxydes de fer)
22	Calcaire dolomitique ²	100	60 % calcite, 35 % dolomite, 1-3 % minéraux opaques (pyrite uniquement)
23	Dolomie calcitique ²	110	Dolomite cristalline dans une matrice carbonatée micritique, présence de fossiles, 1-5 % minéraux opaques (pyrite uniquement)
26	Basalte	100	75-85 % plagioclase, 10-15 % pyroxène, 1-2 % olivine et chlorite, 2-10 % minéraux opaques (trace de pyrite et oxydes de fer)

¹ Aucun facteur pétrographique de 6 (matériau médiocre) ou de 10 (matériau nuisible – argileux) n'a été attribué lors des examens pétrographiques de chacune des sites de granulats.

² Des plaquages argileux et/ou schisteux ont été observés sur certaines particules lors de l'examen pétrographique.

Les granulats provenant des sites no.5, no.17 et no.23 se composent principalement d'une dolomie calcitique dont la composition minéralogique diffère légèrement d'un site à l'autre. Les sites no.19 et no.26 se composent de granulats de nature basaltique. Les sites no.11, no.14 et no.22 sont respectivement composés d'une calcilutite, calcilutite fossilifère et d'un calcaire dolomitique.

Les roches sédimentaires ont une composition qui varie en fonction des conditions de mise en place, c'est-à-dire les conditions dans lesquelles les sédiments se sont déposés puis consolidés avec le temps. Afin de faciliter le dénombrement des différents faciès observés sur les lames minces polies, un tableau a été ajouté dans les rapports d'examen pétrographique afin d'établir le nombre d'occurrence des différents faciès observés ainsi que leurs particularités. La distinction de ces différents faciès ne peut être réalisée qu'avec l'aide d'un microscope.

Pour les granulats de chaque site, un nombre pétrographique (NP) a été obtenu. Les NP correspondent à une bonne qualité physico-mécanique, du point de vue pétrographique, pour la production du béton. En se référant au Tableau A2.2 de la norme CSA A23.2-15A (14), tous les granulats à l'exception de ceux provenant du site no.5, peuvent être utilisés dans la fabrication de béton de classe d'exposition F-1, C-XL, C-1 et C-2, puisqu'un NP inférieur à 125 est suggéré pour ces catégories de béton.

Lors des examens pétrographiques, un facteur pétrographique est attribué à chacun des faciès observés dans les échantillons. Un facteur de 1 est normalement utilisé pour un faciès qui possède une bonne qualité pétrographique. Des facteurs de 3, 6 et 10 sont couramment utilisés pour les faciès qui présentent respectivement une qualité pétrographique passable, médiocre et nuisible. Des facteurs intermédiaires peuvent également être utilisés si la pierre présente de bonnes qualités pétrographiques mais a une dureté moindre. Dans le cas présent, la majorité des faciès observés ont une bonne qualité pétrographique. Cependant, des plaquages argileux ont été observés sur certaines particules de granulats. La quantité de granulats présentant des plaquages argileux varie selon la source de granulats. En multipliant le facteur avec la proportion pondérée granulométrique pour chacun des faciès, un NP cumulatif est obtenu. La somme de ces NP cumulatifs donne le NP associé au gros granulat analysé, ce qui correspond dans le cas présent à un nombre pétrographique variant de 100 à 129 selon la source de granulat. Il est important de mentionner que pour chacun des sites de granulats, les analyses pétrographiques ont permis de déterminer que les granulats présentent moins de 2,0 % de matériaux nuisibles (argileux).

2.2.2 Détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat

La détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat a été réalisée conformément à la norme CSA A23.2-12A. Les essais ont été effectués sur le calibre 5-14 mm des 8 sites retenus. Les résultats sont présentés au Tableau 6.

Tableau 6 : Densité et absorption du gros granulat (calibre 5-14 mm)

Site	Densité brute	Densité brute SSS*	Absorption (%)
5 – Dolomie calcitique	2,78	2,79	0,64
11 – Calcilutite	2,75	2,77	0,49
14 – Calcilutite fossilifère	2,71	2,72	0,47
17 – Dolomie calcitique	2,70	2,72	0,54
19 – Basalte	2,52	2,53	0,50
22 – Calcaire dolomitique	2,70	2,71	0,37
23 – Dolomie calcitique	2,69	2,71	0,86
26 – Basalte	2,91	2,93	0,63

* granulat saturé et sec en surface.

Les résultats montrent une densité brute variant de 2,52 à 2,91 ainsi qu'une absorption se situant entre 0,37 % et 0,86 % selon le granulat. Un granulat avec une absorption élevée est habituellement plus susceptible d'être affecté par l'action des cycles répétés de gel-dégel. Toutefois, cette observation n'est pas toujours applicable, car la nature et la qualité pétrographique (composition minéralogique, degré de cristallinité, etc.) du granulat peut influencer la performance des granulats face au gel-dégel.

2.3 MÉLANGES DE BÉTON ET ESSAIS EN LABORATOIRE

Le retrait des notes 1 à 5 pourrait avoir un impact majeur pour les producteurs de pierres à béton dont les granulats sont présentement utilisés dans des bétons de classe d'exposition F-1, C-XL, C-1 et C-2. Il était donc important de démontrer la performance en durabilité de bétons fabriqués à partir des granulats retenus. Pour ce faire, des bétons de classe d'exposition C-2 et F-1 ont été confectionnés puis soumis à une série d'essai de performance en laboratoire. Les essais ont consisté notamment à évaluer la performance de mélanges de béton de classe C-2 à l'essai de résistance à l'écaillage (BNQ 2621-905/2012) et la performance de mélanges de béton de classe F-1 à l'essai de résistance à l'écaillage ainsi qu'à l'essai de résistance aux cycles répétés de gel-dégel procédure A (ASTM C666).

Au total, 12 mélanges de béton ont été réalisés, soit un mélange de béton de classe d'exposition C-2 pour chacun des 8 sites retenus ainsi que 4 mélanges de béton de classe d'exposition F-1. Les 4 sites de granulats sélectionnés pour les mélanges de béton de classe d'exposition F-1 sont les granulats provenant des sites no.5, no.14, no.19 et no.23. Ces sites ont été sélectionnés afin que chaque situation concernant les critères d'acceptation des granulats selon les notes 2 et 3 soit représentée.

- ▶ Site no.5 : Le résultat obtenu au gel-dégel non confiné est conforme, mais se situe près de la limite permise sans la note 2. Le résultat est aussi conforme à l'exigence du micro-Deval sans avoir recours à la note 3.
- ▶ Site no.14 : Les granulats ont recours à l'assouplissement de la limite pour être conforme au gel-dégel non confiné. Ils sont toutefois conformes à l'exigence du micro-Deval, et ce, sans l'assouplissement.
- ▶ Site no.19 : Il s'agit de la pierre « témoin », puisque les granulats sont conformes aux exigences au gel-dégel non confiné et au micro-Deval, et ce, sans les notes 2 et 3.
- ▶ Site no.23 : Le résultat au gel-dégel non confiné est conforme, mais près de la limite permise sans la note 2. Cependant, le résultat n'est pas conforme à l'exigence du micro-Deval et ce, même avec la note 3.

Les prochaines sections présentent les résultats obtenus lors de l'évaluation de la performance des mélanges de béton confectionnés à partir des granulats sélectionnés. Pour les mélanges de béton de classe d'exposition C-2, quatre cylindres de béton ont été fabriqués afin de déterminer les caractéristiques du réseau de vides d'air et la résistance à la compression à 7 et 28 jours. Deux plaques de béton ont également été fabriquées afin de déterminer la résistance à l'écaillage de ces bétons. Les mêmes essais ont été réalisés sur les mélanges de béton de classe d'exposition

F-1 à l'exception de la confection de prismes de béton supplémentaires afin de déterminer la résistance aux cycles répétés de gel-dégel pour ces mélanges.

2.3.1 Résultats d'essais sur le béton à l'état plastique

Tel que mentionné précédemment, 12 mélanges de béton ont été réalisés dont 8 mélanges de béton de classe d'exposition C-2 et 4 mélanges de béton de classe d'exposition F-1. Les principales propriétés physiques du béton à l'état plastique (béton frais) ont été déterminées, soit l'affaissement, la teneur en air, la masse volumique et la température du béton lors de la mise en place.

Les formulations théoriques de béton utilisées pour chacun des mélanges sont détaillées à l'Annexe 3. Pour les mélanges de béton de classe d'exposition C-2, un rapport eau/ciment de 0,45 et une quantité de liant de 365 kg/m³ ont été utilisés. Concernant les mélanges de béton de classe d'exposition F-1, un rapport eau/ciment de 0,50 et une quantité de liant de 335 kg/m³ ont été utilisés. Le Tableau 7 (page suivante) présente les quantités de chacun des constituants utilisés dans la fabrication des mélanges de béton. Les valeurs sont exprimées en fonction d'une gâchée de 1 m³ de béton. Les résultats d'essais sur béton à l'état plastique sont également présentés dans ce tableau.

Selon les exigences de la norme CSA A23.1-14, un béton de classe d'exposition C-2 et F-1 est conforme lorsque la teneur en air se situe entre 5 et 8 % et que la température du béton lors de la mise en place se situe entre 10 et 32°C. Pour un affaissement prescrit de 80 mm, une tolérance de ± 30 mm est recommandée selon la norme CSA A23.1-14.

Les résultats démontrent que ces exigences sont respectées, à l'exception des mélanges de béton no.5 (C-2) et no.19 (C-2) où un affaissement inférieur à 50 mm a été obtenu. Ces deux mélanges de béton ont donc été repris de façon à s'assurer que les exigences sont rencontrées. Il est également possible d'observer au Tableau 7 que la température des bétons était relativement élevée lors de la mise en place. L'obtention de telles températures est expliquée par le fait que la température ambiante où étaient conservés les constituants a été affecté par les températures chaudes enregistrées au mois de juillet. Toutefois, les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures à la température ambiante du laboratoire (température variant de 18,3°C à 26,5°C), sous une jute humide et d'une pellicule de plastique, avant d'être démoulées. Bien que la norme CSA A23.2-3C spécifie une température initiale de cure entre 15°C et 25°C, nous jugeons que les écarts enregistrés sont marginaux et n'ont pas influencés le développement de la résistance des bétons et la performance de ceux-ci aux essais de durabilité.

Tableau 7 : Propriétés physiques des mélanges de béton à l'état plastique

Constituants	Classe d'exposition C-2										Classe d'exposition F-1			
	5	5 reprise	11	14	17	19	19 reprise	22	23	26	5	14	19	23
Gros granulat (5-14 mm)	988 kg	992 kg	988 kg	976 kg	976 kg	944 kg	936 kg	972 kg	976 kg	1 012 kg	960 kg	949 kg	917 kg	940 kg
Sable	812 kg	816 kg	808 kg	800 kg	800 kg	768 kg	772 kg	796 kg	796 kg	832 kg	886 kg	874 kg	843 kg	871 kg
Ciment	365 kg	365 kg	365 kg	365 kg	365 kg	365 kg	365 kg	365 kg	365 kg	365 kg	335 kg	335 kg	335 kg	335 kg
Eau	164 kg	156 kg	160 kg	164 kg	164 kg	156 kg	156 kg	168 kg	168 kg	164 kg	166 kg	166 kg	160 kg	169 kg
Entraîneur d'air (Master Air AE 210)	208 ml	112 ml	168 ml	160 ml	160 ml	160 ml	112 ml	160 ml	160 ml	160 ml	120 ml	120 ml	120 ml	120 ml
Réducteur d'eau (Pozzolith 210 BASF)	912 ml	920 ml	912 ml	912 ml	912 ml	912 ml	912 ml	912 ml	912 ml	912 ml	837 ml	837 ml	837 ml	837 ml
Essais	Propriétés du béton à l'état plastique Classe d'exposition C-2										Propriétés du béton à l'état plastique Classe d'exposition F-1			
Affaissement (mm)	40	85	70	95	70	45	90	70	60	65	90	90	90	95
Teneur en air (%)	5,8	7,0	5,5	5,5	6,5	5,5	7,4	7,6	6,0	6,5	5,6	7,2	6,6	6,8
Masse volumique (kg/m³)	2 376	2 332	2 382	2 363	2 338	2 283	2 223	2 325	2 334	2 410	2 389	2 321	2 213	2 297
Température (°C)	27,1	21,2	26,8	28,0	27,1	27,4	20,3	26,5	27,8	27,0	27,9	27,1	29,0	27,6

Note : Les valeurs en rouge sont non conformes, car la norme CSA A23.1-14 recommande une tolérance de ± 30 mm pour un affaissement prescrit de 80 mm.

2.3.2 Détermination de la résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression a été réalisée selon la norme CSA A23.2-9C. Pour chaque mélange, trois cylindres de béton ont été confectionnés afin de déterminer la résistance à la compression à 7 jours et 28 jours. Le Tableau 8 présente les résultats obtenus selon les différents mélanges de béton.

Tableau 8 : Résistance à la compression

Classe d'exposition	Granulat / site	Résistance à la compression (MPa)			
		7 jours	28 jours (1)	28 jours (2)	28 jours (moyenne)
Classe d'exposition C-2	5	30,7	37,9	37,5	37,7
	5 reprise	38,7	46,0	45,0	45,5
	11	29,2	33,3	34,1	33,7
	14	31,3	38,1	36,7	37,4
	17	30,9	36,4	35,3	35,9
	19	34,4	40,3	39,0	39,7
	19 reprise	37,4	43,0	44,6	43,8
	22	27,6	33,7	34,5	34,1
	23	30,1	36,4	35,5	36,0
	26	28,8	35,8	35,4	35,6
Classe d'exposition F-1	5	28,1	33,7	35,1	34,4
	14	28,0	32,1	33,1	32,6
	19	28,6	34,9	35,0	35,0
	23	26,0	32,2	32,6	32,4

Selon les exigences du Tableau 2 de la norme CSA A23.1-14, un béton de classe d'exposition C-2 doit avoir une résistance à la compression minimale de 32 MPa à 28 jours. Les résultats obtenus démontrent que la résistance à la compression des bétons respecte cette exigence. Les résultats obtenus varient de 33,7 MPa à 39,7 MPa selon le mélange.

Concernant les mélanges de béton qui ont été repris, soit les bétons de classe C-2 confectionnés à partir des granulats des sites no.5 et no.19, une résistance à la compression de 45,5 MPa et 43,8 MPa ont respectivement été obtenues à 28 jours. Ces résultats sont supérieurs à ceux obtenus pour les autres mélanges de béton de classe d'exposition C-2. L'analyse de la procédure de malaxage ainsi que la formulation de béton n'a pas permis d'identifier d'éléments pouvant expliquer les écarts observés à

l'exception du rapport eau/ciment légèrement inférieur pour la reprise du site no.5. Les températures de malaxage plus basses pour les deux reprises pourraient également avoir contribué à l'augmentation des résistances à 28 jours. Toutefois, nous jugeons que ces écarts n'ont pas eu d'impact significatif sur les résultats d'essais de performance et de durabilité.

Pour un béton de classe d'exposition F-1, la résistance à la compression minimale doit être supérieure à 30 MPa à 28 jours. Les résultats obtenus démontrent que la résistance à la compression des bétons respecte cette exigence. Les résultats varient entre 32,4 et 35,0 MPa.

2.3.3 Détermination des caractéristiques du réseau de vides d'air

La détermination des caractéristiques du réseau de vides d'air a été réalisée conformément à la norme ASTM C457. Pour chacun des mélanges de béton, une éprouvette a été confectionnée puis conservée pour une période de 28 jours dans une chambre à température et humidité contrôlée. Les caractéristiques du réseau de vides d'air ont été évaluées suite à cette période de murissement. Les résultats sont présentés au Tableau 9.

Tableau 9 : Caractéristiques du réseau de vides d'air

Classe d'exposition	Site	Facteur d'espacement (μm)	Teneur en air du béton durci (%)	Surface spécifique (mm^{-1})
Classe d'exposition C-2	5	111	3,9	50,4
	5 reprise	99	4,5	51,4
	11	104	3,9	53,5
	14	126	3,4	47,3
	17	115	4,1	47,2
	19	117	3,6	51,4
	19 reprise	140	5,8	32,6
	22	81	5,4	56,1
	22 relecture	99	4,6	52,2
	23	120	4,6	41,8
	26	143	5,0	33,7
Classe d'exposition F-1	5	93	3,5	60,5
	5 relecture	103	3,9	53,5
	14	96	4,0	52,6
	19	96	5,8	45,3
	23	116	4,7	45,2

Selon l'article 4.3.3.4 de la norme CSA-A23.1-14 - *Béton : Constituants et exécution des travaux*, un réseau de bulles d'air est considéré satisfaisant dans le béton lorsque la moyenne de tous les résultats d'essais établit le facteur d'espacement du béton à un maximum de 230 μm sans qu'un seul résultat n'excède 260 μm et que la teneur en air du béton durci est supérieure ou égale à 3,0 %. Le facteur d'espacement ainsi que la teneur en air mesurés sur chacun des mélanges de béton rencontrent ces critères, ce qui indique que l'ensemble des bétons est composé d'un réseau de vides d'air permettant au béton de résister aux cycles répétés de gel-dégel.

Les résultats montrent également que des surfaces spécifiques élevées ont été obtenues pour les bétons no.5 (F-1) et no.22 (C-2). En effet, les valeurs sont respectivement de 60,5 mm^{-1} et 56,1 mm^{-1} . Lors de la lecture des plaques de béton polie, il a été observé que les bétons avec une surface spécifique élevée contenaient une plus grande quantité de bulles de petites dimensions comparativement à un béton dont la surface spécifique varie entre 20 mm^{-1} et 40 mm^{-1} . Les bulles d'air sont également très rapprochées les unes des autres, ce qui expliquerait l'obtention d'un facteur d'espacement de 93 μm et 81 μm pour les bétons no.5 (F-1) et no.22 (C-2) respectivement. Afin de vérifier et valider ces valeurs, les plaques de béton de ces deux mélanges ont fait l'objet d'une relecture. Les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus la première fois, confirmant que le réseau de vides d'air présente une grande quantité de petites bulles très rapprochées.

2.3.4 Détermination de la résistance à l'écaillage

La détermination de la résistance à l'écaillage du béton soumis à des cycles de gel-dégel en contact avec des sels de déglacage, a été réalisée sur les 12 mélanges de béton selon la procédure présentée à l'annexe B de la norme BNQ 2621-905/2012. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 10. Dans le but de compléter l'analyse, des photographies des plaques d'écaillage ont été prises à chaque échéance, soit après avoir subi 7, 21, 35 et 56 cycles de gel-dégel. Les photographies des plaques sont présentées à l'annexe 4.

Selon les exigences de la norme, la perte de masse d'un béton de classe d'exposition C-2 doit être égale ou inférieure à 0,50 kg/m² après 56 cycles.

Tableau 10 : Résistance à l'écaillage

Classe d'exposition	Site	Perte de masse par écaillage (kg/m ²)			
		Après 7 cycles	Après 21 cycles	Après 35 cycles	Après 56 cycles
Classe d'exposition C-2	5	0,03	0,05*	0,07	0,09
	5 reprise	0,08	0,10	0,12	0,12
	11	0,04	0,06*	0,07	0,07
	14	0,21	0,29*	0,34	0,40
	17	0,22	0,26*	0,29	0,32
	19	0,27*	0,31	0,34	0,37
	19 reprise	0,03	0,05	0,05	0,06
	22	0,06*	0,10	0,11	0,12
	23	0,15	0,19*	0,23	0,26
	26	0,16	0,19	0,20	0,21
Classe d'exposition F-1	5	0,29	0,31*	0,32	0,34
	14	0,11*	0,18	0,20	0,22
	19	0,21*	0,24	0,26	0,28
	23	0,12*	0,18	0,23	0,27

* Des cônes d'éclatement ont été observés sur la surface.

Les résultats démontrent que la perte de masse mesurée après 56 cycles est inférieure à 0,50 kg/m² sur l'ensemble des bétons de classe d'exposition C-2 et F-1. En ce qui concerne les bétons de classe d'exposition C-2, une tendance a été observée entre les résultats obtenus à l'essai au gel-dégel non confiné et ceux obtenus à l'essai de résistance à l'écaillage. Les bétons incorporant des granulats qui performant moins bien au gel-dégel non confiné présentent une plus grande perte de masse à l'écaillage.

En effet, en comparant les résultats obtenus pour les bétons incorporant les granulats provenant des sites no.5, no.11, no.22 et no.26 avec ceux des bétons fabriqués avec les granulats provenant des sites no.14 et no.17, la perte de masse à l'écaillage de ces derniers est de 2 à 3 fois plus importante. Cependant, il est important de mentionner que des cônes d'éclatement ont été observés après 7 cycles de gel-dégel pour le béton incorporant les granulats du site no.22 ainsi qu'après 21 cycles pour les autres bétons, à l'exception du béton confectionné à partir des granulats du site no.26 où seulement de l'écaillage du mortier de surface a été observé.

Pour les bétons de classe d'exposition F-1, aucune tendance n'a été observée. Une perte de masse variant de 0,22 à 0,34 kg/m² a été mesurée selon le mélange de béton. Il est toutefois important de mentionner que des cônes d'éclatement ont également été observés sur la surface des plaques après 7 cycles pour les bétons incorporant les granulats provenant des sites no.14, no.19 et no.23, et après 21 cycles pour le site no.5.

Selon la norme BNQ 2621-905/2012, il est également possible d'interpréter les résultats à la fin des 56 cycles en évaluant qualitativement la surface des plaques à l'aide d'un système de cotes présenté au Tableau 11. L'utilisation de ce barème permet d'obtenir des informations supplémentaires sur la performance des mélanges de béton lors de cet essai.

Tableau 11 : Barème d'interprétation des résultats de résistance à l'écaillage

Cote	Caractéristiques de la surface écaillée
0	Aucun écaillage important observé
1-A	Écaillage très léger du mortier de surface avec absence de cratères (<i>popouts</i>)*
1-B	Écaillage important du mortier de surface avec absence de cratères (<i>popouts</i>)*
2-A	Aucun écaillage important du mortier de surface, mais présence de quelques cratères (<i>popouts</i>)*
2-B	Aucun écaillage important du mortier de surface, mais présence de plusieurs cratères (<i>popouts</i>)*
3	Combinaison du mortier de surface écaillée principalement avec de gros granulats éclatés.
4	Combinaison de gros granulats éclatés principalement avec du mortier de surface écaillée.

* La formation de cratères (*popouts*) peut être causée par la rupture du granulat ou par le décollement soudain du mortier au-dessus du granulat.

L'utilisation de ce barème permet de mieux différencier une perte de masse associée au mortier de surface comparativement à une perte de masse associée à la combinaison d'un écaillage du mortier de surface et la présence de gros granulats éclatés.

Le Tableau 12 présente les observations réalisées avec l'aide du barème d'interprétation de la norme. Une évaluation visuelle sommaire de la surface des dalles d'écaillage a également été réalisée afin de déterminer la proportion de la surface associée à l'écaillage du mortier de surface ou à l'écaillage induit par l'éclatement d'un gros granulat. Les proportions sont présentées de façon distincte au Tableau 12, permettant ainsi de compléter l'analyse.

Tableau 12 : Interprétation des résultats à l'écaillage

Classe d'exposition	Site	Perte de masse par écaillage après 56 cycles (kg/m ²)	Interprétation visuelle de la surface écaillée selon la norme	Évaluation visuelle sommaire de la surface écaillée	
				Écaillage du mortier de surface (%)	Écaillage induit par l'éclatement d'un gros granulat (%)
Classe d'exposition C-2	5	0,09	Cote 2-A	5 %	2-3 %
	5 reprise	0,12	Cote 2-A	10 %	< 1 %
	11	0,07	Cote 2-A	5 %	2-3 %
	14	0,40	Cote 3	60 %	25 %
	17	0,32	Cote 3	60 %	15 %
	19 ¹	0,37	Cote 4	60 %	10 %
	19 reprise	0,06	Cote 2-A	10 %	2-3 %
	22	0,12	Cote 3	20 %	25 %
	23	0,26	Cote 3	60 %	15 %
	26	0,21	Cote 1-B	65 %	-
Classe d'exposition F-1	5	0,34	Cote 4	70 %	5 %
	14	0,22	Cote 3	15 %	10 %
	19	0,28	Cote 1-B	60 %	2-3 %
	23	0,27	Cote 3	15 %	15 %

¹ Les résultats du site no.19 (C-2) ont été affectés par une mauvaise finition des dalles de béton.

Les résultats présentés au Tableau 12 démontrent que la perte de masse ainsi que la cote d'écaillage ne sont pas toujours représentatif de la performance des bétons. L'évaluation sommaire des proportions de la surface écaillée permet entre autres de constater ce que les cotes ou la perte de masse ne permettent pas d'identifier, soit l'étendue des dommages associés à l'écaillage du mortier de surface comparativement à l'écaillage associé à l'éclatement des gros granulats. La détermination des proportions de la surface écaillée a permis de mettre en évidence qu'il y a beaucoup plus de cônes d'éclatement présents sur la surface des bétons de classe d'exposition C-2 qui incorporent des granulats qui ne respectent pas les exigences du Tableau 12 sans les

notes 2 et 3. En effet, les bétons confectionnés à partir des granulats provenant des sites no.14, no.17, no.22 et no.23 montrent une proportion de cônes d'éclatement variant de 15 à 25 %, comparativement à environ 3 % pour les sites dont les granulats respectent les exigences du Tableau 12 sans les notes. À l'exception des granulats provenant du site no.22, les granulats des sites qui présentent le plus de cônes d'éclatement contiennent une quantité variable d'un faciès carbonaté argileux et/ou schisteux. Le site no.22 est en fait un exemple où la présence des plaquages argileux sur les granulats est marginale. La probabilité que ces plaquages argileux se retrouvent près de la surface du béton et causent du même coup des cônes d'éclatement, est faible. La faible présence des plaquages argileux est aussi la raison pour laquelle un nombre pétrographique de 100 a été attribué aux granulats de ce site. Il semble donc y avoir une corrélation entre les concentrations en faciès argileux et l'apparition de cônes d'éclatement. En effet, la résistance, la dureté et la ténacité des faciès argileux et/ou schisteux est plus faible et génère des zones de faiblesse qui provoquent la délamination de ces faciès sous certaines conditions.

Pour les bétons de classe d'exposition F-1, il a été possible de remarquer que les bétons incorporant des granulats qui respectent les exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1, sans les notes, soit les granulats des sites no.5 et no.19, sont ceux dont la perte de masse est plus élevée, mais dont la présence de cônes d'éclatement est la plus faible. L'évaluation sommaire des proportions permet de démontrer que pour ces bétons, la perte de masse est presque uniquement associée à l'écaillage du mortier de surface. Concernant les bétons incorporant les granulats des sites no.14 et no.23, l'évaluation sommaire des proportions a permis d'observer que la surface écaillée est moins importante que celle observée sur les bétons des sites no.5 et no.19, mais que le pourcentage d'écaillage associé à l'éclatement de gros granulat est plus significatif (10 % à 15 %).

2.3.5 Résistance aux cycles de gel-dégel (ASTM C666 procédure A)

La détermination de la résistance aux cycles de gel-dégel a été réalisée selon la procédure A de la norme ASTM C666. La procédure A spécifie que la période de gel et de dégel est réalisée dans l'eau. Les essais ont été réalisés au laboratoire du groupe de recherche sur le béton de l'Université de Sherbrooke. Au total, 4 mélanges de béton de classe d'exposition F-1 ont été soumis à l'essai, soit les mélanges de béton fabriqués avec les granulats provenant des sites no.5, no.14, no.19 et no.23. L'annexe 6 présente le rapport détaillé produit par l'Université de Sherbrooke.

La résistance aux cycles de gel-dégel dans l'eau d'un béton est normalement évaluée selon les critères suivants :

- ▶ L'allongement des prismes après 300 cycles de gel-dégel dans l'eau;
- ▶ Le facteur de durabilité du béton après 300 cycles de gel-dégel dans l'eau.

Ces deux critères sont utilisés pour caractériser la présence ou non de microfissuration du béton générée lors de l'action répétée des cycles de gel-dégel. La norme ASTM C666 indique qu'un béton est durable face au gel-dégel lorsque l'allongement maximal du béton est inférieur à 1000 $\mu\text{m/m}$. Toutefois, un allongement maximal de 500 $\mu\text{m/m}$ peut être utilisé dans le but d'être plus conservateur sur la durabilité des bétons face au gel-dégel. L'allongement des prismes est déterminé par des mesures de variation de longueur des prismes à chaque intervalle de mesure.

Toujours selon la norme ASTM C666, un béton durable face aux cycles de gel-dégel doit avoir un facteur de durabilité supérieur à 60 % après 300 cycles, mais certaines publications suggèrent que cette valeur limite soit incrémentée à 80 % pour avoir une meilleure résistance au gel-dégel. Le facteur de durabilité est déterminé sur la base de mesures de la propagation d'onde dans les prismes de béton.

Afin de compléter l'analyse, des photographies des prismes ont été prises à chaque intervalle de mesure. Les photographies sont présentées à l'annexe 7. Pour chacun des mélanges de béton, le Tableau 13 présente la moyenne des résultats obtenus à l'essai après plus de 300 cycles de gel-dégel dans l'eau.

Tableau 13 : Résistance aux cycles de gel-dégel dans l'eau

Classe d'exposition	Site	Variation de masse (%)	Allongement ($\mu\text{m/m}$)	Facteur de durabilité (%)
Classe d'exposition F-1	5	+ 0,3	123	100
	14	- 0,1	159	99
	19	0	103	97
	23	- 1,1	235	99

Les résultats obtenus démontrent que les 4 mélanges de béton respectent les critères de performance face aux cycles de gel-dégel. Il a également été possible de remarquer que les bétons incorporant des granulats qui ne respectent pas les exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 sans les notes, présentent une perte de masse et un allongement légèrement plus élevés que les bétons incorporant des granulats qui respectent les exigences sans les notes. En effet, les granulats du site no.23 qui ne respectent pas la limite permise au micro-Deval, et ce, même avec la note 3, et qui se situent tout près de la limite au gel-dégel non confiné sans la note 2, présentent une variation de masse de 1,1 % et un allongement de 235 $\mu\text{m/m}$. Une variation de masse quasi-nulle et un allongement de 123 $\mu\text{m/m}$ et 105 $\mu\text{m/m}$ ont respectivement été obtenus pour les bétons intégrant des granulats qui respectent les exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 sans les notes, soit les granulats provenant des sites no.5 et no.19.

Concernant le béton confectionné avec des granulats qui ont recours à la note 2 du Tableau 12 pour se qualifier au gel-dégel non confiné (site no.14), les résultats démontrent que la variation de masse et l'allongement mesurés sont légèrement plus élevés que les résultats obtenus sur les bétons incorporant les granulats provenant des sites no.5 et no.19. De plus, il est important de mentionner que malgré l'obtention d'une variation de masse et un allongement un peu plus élevés pour les sites no.14 et no.23, un facteur de durabilité de 99 % a été obtenu, ce qui démontre que les mélanges de béton ont une bonne durabilité face aux cycles répétés de gel-dégel dans l'eau.

3 CONCLUSION

À la lumière de l'ensemble des résultats obtenus jusqu'à présent, ceux-ci démontrent que les bétons de classe d'exposition C-2 et F-1 confectionnés à partir de granulats dont les propriétés physiques sont acceptées grâce aux notes 2 et 3 du Tableau 12 de la norme CSA A23.1, sont, malgré tout, conformes aux critères respectifs d'acceptation en fonction des différents essais de performance sous conditions de gel-dégel.

Toutefois, les résultats d'essai démontrent également que divers facteurs, autres que les propriétés physico-mécaniques (gel-dégel non confiné et micro-Deval) des granulats, sont déterminants sur la qualification d'un granulat en vue d'une utilisation dans un béton soumis aux conditions de gel-dégel. Selon les résultats obtenus à l'essai de résistance à l'écaillage, l'apparition de cônes d'éclatement est principalement causée par deux facteurs prépondérants. Le premier étant la proximité du granulat en surface du béton, et ce, peu importe ses caractéristiques physico-mécaniques ou sa nature pétrographique. Le deuxième étant la présence de plaquages argileux et/ou schisteux sur les particules de granulat. Ce facteur est important dans la mesure où les cônes d'éclatement présents en surface des éprouvettes ayant servi à l'essai d'écaillage sont principalement causés par la présence de ces plaquages argileux. En analysant les fragments désagregés à l'essai d'écaillage, il a été possible d'observer que les particules de granulats provenant des cônes d'éclatement sont essentiellement associées aux plaquages argileux.

De ce fait, nous estimons qu'il est justifié que la note 2 du Tableau 12 qui permet une extension de la limite de 6% à 9% à l'essai de gel-dégel non confiné soit maintenue dans la norme CSA A23.1. Nous recommandons également que cette note soit réécrite dans le but de clarifier le texte et d'inclure dans cette dernière la classe d'exposition F-2. En effet, la classe F-2 (béton soumis au gel-dégel, en condition non saturée, mais non exposé aux chlorures) est moins sévèrement exposée que la classe F-1 (béton soumis au gel-dégel, en condition saturée, mais non exposé aux chlorures) qui est inclus dans les notes. Nous sommes d'avis que cette distinction va permettre une utilisation plus appropriée des granulats de meilleure qualité, donc une meilleure gestion des sources de granulats.

Il serait également fort intéressant, à plus ou moins court terme, qu'un comité de normalisation ou autres soit formé afin d'approfondir davantage les connaissances sur l'influence de la présence des plaquages argileux, et ce, afin d'éventuellement établir une limite acceptable de ces plaquages permettant l'obtention d'un ouvrage acceptable au point de vue esthétique.

Pour ce qui est de l'essai d'abrasion au micro-Deval, nous constatons que l'influence est marginale sur la résistance au gel et dégel et à l'écaillage. Ainsi, l'extension de la limite à 19% que permet la note 3 ne représente pas un facteur déterminant dans l'apparition des cônes d'éclatement.

Conséquemment, nous recommandons que la note 3 soit conservée mais réécrite dans le but de clarifier le texte, et d'inclure dans cette dernière la classe d'exposition F-2 pour les mêmes motifs que ceux déjà invoqués précédemment.