Étude de l'influence de la qualité du granulat sur la résistance à l'écaillage du béton

Présentée à :

M. Alain Hovington, ing.
Secteur béton
Direction des matériaux d'infrastructures
Ministère des Transports

Dossier : 4502-17-RA02
Activité : R758.2

Rédigé par :

Richard Gagné, ing. Ph.D.
Benoit Fournier, ing. Ph.D.
Nicolas Le Piquet, M.Sc.A.
Olivier Bonneau, Ph.D.
Mathieu Thomassin Mailhot, ing. M.Sc.
Andreia Rodrigues, Ph.D.

Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB)

Département de génie civil et de génie du bâtiment
Université de Sherbrooke

Département de génie civil et de génie des eaux
Département de géologie et de génie géologique
Université Laval

18 novembre 2021

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION 1
1.1 Contexte de l'étude 1
1.2 Objectifs de l'étude 2
1.3 Structure du programme de recherche 3
1.4 Équipe de recherche 6

2 CONTENU ET STRUCTURE DU DOCUMENT 8

3 ÉTAT DE L'ART SUR LA DURABILITÉ DES GROS GRANULATS DANS LES BÉTONS EXPOSÉS À DES CYCLES DE GEL-DÉGEL EN PRÉSENCE DE SELS FONDANTS 10
3.1 Mécanismes d'action du gel-dégel 10
3.1.1 Écaillage 10
3.1.1.1 Modèle des pressions hydrauliques 12
3.1.1.2 Modèle des pressions osmotiques 12
3.1.2 Paramètres d'influence 14
3.1.2.1 Volume d'air et facteur d'espacement 14
3.1.2.2 Rapport E/C 16
3.1.2.3 Fumée de silice 16
3.1.2.4 Cendres volantes 16
3.1.2.5 Laitiers de haut fourneau 17
3.2 Les gros granulats 17
3.2.1 Caractéristiques et définitions 17
3.2.2 Influence des gros granulats sur la résistance à l'écaillage du béton 18
3.3 Essais et normes 20
3.3.1 Essai micro-Deval 20
3.3.2 Essai de gel-dégel non confiné 25
3.3.3 Combinaison des résultats de la perte micro-Deval et de la perte au gel-dégel non confiné 29
3.3.4 Essai d'écaillage 29
3.3.5 Exigences normatives pour les propriétés physiques des gros granulats 32

4 CHOIX ET ÉCHANTILLONNAGE DES SOURCES GRANULAIRES 35
4.1 Critères de sélection 35
4.2 Choix des catégories de performance 35
4.3 Échantillonnage des sources granulaires 35
4.4 Stockage des sources granulaires 36

5 PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES ET CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION DES SOURCES GRANULAIRES 38
5.1 Source 1 38
5.2 Source 2 39
5.3 Source 3 40
5.4 Source 4 41
5.5 Source 5 42
5.6 Source 6 43
5.7 Source 7 44
5.8 Source 8 45
5.9 Source 9 46
5.10 Source 10 47
5.11 Source 11 48

5.12 Source 12 49
5.13 Source 13 50
5.14 Source 14 51
5.15 Source 15 52
5.16 Source 16 53
5.17 Source 17 54
5.18 Source granulaire disponible à l'Université de Sherbrooke (source 18) 55
5.19 Regroupement des sources granulaires selon trois catégories 57

6 CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS 58
6.1 Matériaux 58
6.1.1 Granulat fin 58
6.1.2 Liants 59
6.1.3 Adjuvants 59
6.2 Identification des bétons 59
6.3 Formulation et propriétés des bétons frais et durcis 60
6.3.1 Béton fabriqués à l'Université de Sherbrooke 60
6.3.1.1 Bétons de type VS avec le calibre de gros granulat 5-20 mm - Phase 1 60
6.3.1.2 Bétons de type VS avec le calibre de gros granulat 5-14 mm - Phase 2 62
6.3.1.3 Bétons de type XIII avec le calibre de gros granulat 5-14 mm - Phase 3 63
6.3.1.4 Bétons de type F2 avec le calibre de gros granulat 5-20 mm - Phase 4 65
6.3.1.5 Bétons de type VS avec le calibre de gros granulat 5-20 mm pour l'étude de l'influence du facteur d'espacement - Phase 5 66
6.3.1.6 Bétons de type C2 avec le calibre de gros granulat 5-20 mm pour l'étude de l'influence du géotextile - Phase 6 68
6.3.2 Bétons fabriqués à l'Université Laval 69

7 PROCÉDURES D'ESSAIS 72
7.1 Fabrication et échantillonnage des bétons 72
7.1.1 Bétons fabriqués à l'Université de Sherbrooke 72
7.1.1.1 Procédure de gâchage 72
7.1.1.2 Échantillonnage 73
7.1.2 Bétons fabriqués à l'Université Laval 74
7.1.2.1 Procédure de gâchage 74
7.1.2.2 Échantillonnage 75
7.2 Murissement des éprouvettes 76
7.2.1 Éprouvettes fabriquées à l'Université de Sherbrooke 76
7.2.2 Éprouvettes fabriquées à l'Université Laval 76
7.3 Essais d'écaillage 77
7.3.1 Procédure à l'Université de Sherbrooke 77
7.3.2 Procédure à l'Université Laval 79
7.4 Mesures et analyse des éclatements et dégarnissements 81
7.4.1 Critères d'identification des éclatements et dégarnissements 82
7.4.1.1 Dégarnissement 82
7.4.1.2 Éclatement (« pop-out ») 83
7.4.2 Procédure d'analyse optique 84

8 RÉSULTATS DES ESSAIS D'ÉCAILLAGE RÉALISÉS AVEC TOUTES LES SOURCES GRANULAIRES 89
8.1 Granulats non lavés 89
8.2 Granulats lavés 96

9 RÉSULTATS DES ESSAIS D'ÉCAILLAGE RÉALISÉS AVEC LE SOUS-ENSEMBLE DE 7 SOURCES GRANULAIRES 99
9.1 Choix et classement des sept sources granulaires 99
9.2 Détails du programme d'essais avec les sept sources granulaires (Phases 1 à 6) 103
9.3 Étude de la durabilité à l'écaillage de bétons de type v-s produits avec des gros granulats de calibre 5-20 mm - phase 1 108
9.3.1 Analyse de la masse des débris 108
9.3.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements 110
9.4 Étude de l'influence de la dimension maximale du gros granulat sur la durabilité a l'écaillage du béton et du gros granulat - phase 2 113
9.4.1 Analyse de la masse des débris 113
9.4.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements 114
9.5 Étude de l'influence d'une matrice de béton à haute performance (Type XIII) sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat - phase 3 115
9.5.1 Analyse de la masse des débris 115
9.5.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements 116
9.6 Étude de l'influence d'une matrice de béton de faible performance (Type F2) sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat - phase 4 117
9.6.1 Analyse de la masse des débris 117
9.6.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements 118
9.7 Étude de l'influence d'une variation des caractéristiques du réseau d'air sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement - phase 5 119
9.7.1 Analyse de la masse des débris 119
9.7.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements 120
9.8 Étude de l'influence du géotextile en fond de moule sur la résistance à l'écaillage d'un béton de Type C2 - phase 6 121
9.8.1 Analyse de la masse des débris 121
9.8.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements 122

10 TESTS D'ÉCAILLAGE INTER LABORATOIRE 124
10.1 Réalisation et conditionnement des bétons 124
10.1.1 Formulation et propriétés générales des bétons 124
10.1.2 Confection et conditionnement des plaques d'écaillage 125
10.2 Caractéristiques des chambres d'écaillage et des cycles de gel-dégel 125
10.2.1 Données récoltées en 2020 dans la cadre de cette étude 125
10.2.2 Données complémentaires de 2019 recueillies par le MTQ 127
10.3 Essais d'écaillage 127
10.3.1 Résultats expérimentaux de 2020 127
10.3.2 Comparaison avec les résultats de 2016 129

11 ANALYSE GLOBALE DES RÉSULTATS 131
11.1 Influence du lavage des granulats sur la résistance à l'écaillage 131
11.2 Influence de la localisation des éprouvettes dans l'enceinte de gel-dégel sur la résistance à l'écaillage 133
11.3 Analyse des relations entre la durabilité à l'écaillage et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné 134
11.3.1 Analyse de toutes les sources granulaires 135
11.3.2 Analyse du sous-ensemble de sept sources granulaires 138
11.3.2.1 Masse des débris 138
11.3.2.2 Surfaces d'éclatements 141

11.3.2.3 Surfaces de dégarnissements 142
11.3.2.4 Somme des surfaces d'éclatements et de dégarnissements 143
11.3.3 Proposition d'une limite maximale de la surface d'éclatement en fonction de l'aspect visuel des plaques d'écaillage 144
11.3.4 Analyse globale de la surface d'éclatement en fonction des pertes aux essais de micro-Deval et de gel-dégel non confiné 146
11.3.5 Analyse de la surface d'éclatement en fonction des exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 150
11.4 Influence de la composition des granulats sur le développement des éclatements 155
11.5 Influence de la dimension maximale du granulat sur la durabilité à l'écaillage 160
11.6 Influence de la qualité de la matrice cimentaire (Type XIII - Type F2 - Type C2) 163
11.7 Influence de la qualité du réseau d'air 165
11.8 Influence du géotextile en fond de moule 166
11.9 Analyse des caractéristiques visuelles des surfaces écaillées 168

12 CONCLUSION 170

13 REFERENCES 174

14 ANNEXES 176
A.1 Macros ImageJ pour la mesure des surfaces d'éclatement et de dégarnissement 176
A.2 Résultats détaillés des essais d'écaillage réalisés à l'Université Laval 178
A.3 Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 1 247
A.4 Évolution des éclatements et des dégarnissements des bétons de la phase 1 269
A.5 Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 2 270
A.6 Évolution des éclatements et des dégarnissements des bétons de la phase 2 274
A.7 Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 3 275
A.8 Évolution des éclatements et des dégarnissements des bétons de la phase 3 277
A.9 Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 4 278
A.10 Évolution des éclatements et des dégarnissements des bétons de la phase 4 280
A.11 Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 5 281
A.12 Évolution des éclatements et des dégarnissements des bétons de la phase 5 282
A.13 Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 6 284
A.14 Évolution des éclatements et des dégarnissements des bétons de la phase 6 288
A.15 Résultats détaillés des tests d'écaillage interlaboratoires 289

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 - Exemple de surface en béton présentant des dégradations par écaillage 11
Figure 3.2 - Exemple de plaque d'écaillage dégradée en conditions de laboratoire 11
Figure 3.3 - Distance $2\,\bar{L}$ séparant deux bulles d'air [1] 12
Figure 3.4 - Représentation schématique du modèle des pressions osmotiques [1] 13
Figure 3.5 - Influence de la concentration en sel sur la dégradation à l'écaillage [1] 13
Figure 3.6 - Pression interne au béton en fonction de la concentration en NaCl [6] 14
Figure 3.7 - Influence du volume d'air entraîné et du type d'agent entraîneur d'air [7] 15
Figure 3.8 - Influence du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage (E/C de 0,43 à 0,47) [7] 15
Figure 3.9 - Combinaisons du volume total des pores et du diamètre médian des pores pour des granulats durables et non-durables [4] 18
Figure 3.10 - Fissuration d'un granulat dans un béton exposé au gel [1] 19
Figure 3.11 - Influence du gros granulat marginal sur la masse de débris en fonction de trois types de comparaisons par rapport au granulat de référence [19] 20
Figure 3.12 - Comparaisons des surfaces de granulats éclatés lors de l'écaillage pour les deux granulats [19] 20
Figure 3.13 - Appareil micro-Deval [19] 22
Figure 3.14 - Corrélation entre l'essai micro-Deval et l'essai de durabilité au sulfate de magnésium [21] 22
Figure 3.15 - Champ des indices de performance des granulats en fonction du nombre pétrographique et de la perte massique à l'essai micro-Deval [21] 23
Figure 3.16 - Résultats interlaboratoires des essais de durabilité au sulfate de magnésium [22] 24
Figure 3.17 - Résultats interlaboratoires des essais micro-Deval pour des gros granulats [22] 24
Figure 3.18 - Perte à l'essai micro-Deval en fonction du module de finesse [23] 25
Figure 3.19 - Échantillon de gel-dégel non confiné [19] 26
Figure 3.20 - Perte massique au gel-dégel en fonction de la température du congélateur [25] 28
Figure 3.21 - Perte massique due au test de durabilité au sulfate de magnésium en fonction de la perte au gel-dégel [25] 29
Figure 3.22 - Présence de feuillets en surface due à un « pop-out » [19] 31
Figure 3.23 - Fracture visible d'un granulat [19] 31
Figure 3.24 - Cône de pâte détachée et fracture visible à la surface du granulat [19] 32

Figure 4.1 - Processus d'échantillonnage des sources granulaires 36
Figure 4.2 - Barils et couvercles métalliques pour le stockage des sources granulaires 37

Figure 5.1 - Aspect visuel du granulat de la source 1, fraction 14 - 20 mm. 38
Figure 5.2 - Aspect visuel du granulat de la source 2, fraction 14 - 20 mm 39
Figure 5.3 - Aspect visuel du granulat de la source 3, fraction 10 - 14 mm 41
Figure 5.4 - Aspect visuel du granulat de la source 4, fraction 14 - 20 mm 42
Figure 5.5 - Aspect visuel du granulat de la source 5, fraction 14 - 20 mm 43
Figure 5.6 - Aspect visuel du granulat de la source 6, fraction 14 - 20 mm 44
Figure 5.7 - Aspect visuel du granulat de la source 7, fraction 14 - 20 mm 45
Figure 5.8 - Aspect visuel du granulat de la source 8, fraction 14 - 20 mm 46
Figure 5.9 - Aspect visuel du granulat de la source 9, fraction 10 - 14 mm 47
Figure 5.10 - Aspect visuel du granulat de la source 10, fraction 14 - 20 mm 48
Figure 5.11 - Aspect visuel du granulat de la source 11, fraction 14 - 20 mm 49
Figure 5.12 - Aspect visuel du granulat de la source 12, fraction 14 - 20 mm 50
Figure 5.13 - Aspect visuel du granulat de la source 13, fraction 14 - 20 mm 51
Figure 5.14 - Aspect visuel du granulat de la source 14, fraction 14 - 20 mm 52
Figure 5.15 - Aspect visuel du granulat de la source 15, fraction 14 - 20 mm 53

Figure 5.16 - Aspect visuel du granulat de la source 16, fraction 10 - 14 mm 54
Figure 5.17 - Aspect visuel du granulat de la source 17, fraction 14 - 20 mm 55
Figure 5.18 - Aspect visuel du granulat de l'Université de Sherbrooke, fraction 5 - 14 mm 56
Figure 5.19 - Granulométrie de la source granulaire 18 57

Figure 6.1 - Résistance à la compression des bétons de la phase 1 61
Figure 6.2 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 1 61
Figure 6.3 - Résistance à la compression des bétons de la phase 2 63
Figure 6.4 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 2 63
Figure 6.5 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 3 64
Figure 6.6 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 4 66
Figure 6.7 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 5 67
Figure 6.8 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 6 69

Figure 7.1 - Malaxeurs utilisés, à gauche pour les phases 1 à 6, à droite pour l'échange interlaboratoires 72
Figure 7.2 - Échantillonnage et finition des plaques d'écaillage (Sherbrooke) 73
Figure 7.3 - Préparation des matériaux (pierre et sable) pour la fabrication des bétons 75
Figure 7.4 - Finition des plaques d'écaillage (CRIB Laval) 76
Figure 7.5 - Conditionnement des échantillons avant le démoulage (24 ± 4h après la coulée) 77
Figure 7.6 - Étagère en acier galvanisé pour le stockage des plaques d'écaillage dans l'enceinte de gel-dégel 78
Figure 7.7 - Éprouvette de béton pour l'essai d'écaillage 78
Figure 7.8 - Dispositif pour la récupération des débris à la surface de l'éprouvettes de béton 79
Figure 7.9 - Emplacement des échantillons durant les essais de résistance à l'écaillage BNQ 2621-905 Annexe B (CRIB Laval) 80
Figure 7.10 - Dispositif permettant la récupération des débris pour la perte de masse à l'écaillage BNQ 2621-905 Annexe B (CRIB Laval) 81
Figure 7.11 - Pesée des débris pour la perte de masse à l'écaillage BNQ 2621-905 Annexe B (CRIB Laval) 81
Figure 7.12 - Exemple du dégarnissement d'une particule du gros granulat sans éclatement 82
Figure 7.13 - Exemple de dégarnissement (cercle rouge) étant apparu avant l'éclatement (cercle noir) d'une particule du gros granulat 83
Figure 7.14 - Exemples de différents éclatements susceptibles d'apparaître lors de l'essai de résistance à l'écaillage réalisé en laboratoire 84
Figure 7.15 - Exemple de relevé de « pop-out » et de dégarnissements sur un acétate 85
Figure 7.16 - Exemple du scan d'un acétate suite au relevé des éclatements et dégarnissements 86
Figure 7.17 - Exemple de sortie de la macro « surf_eclat » 87
Figure 7.18 - Exemple de sortie de la macro « surf_totale » 87

Figure 8.1 - Masse des débris cumulée (kg/m^2) des 17 sources en fonction du nombre de cycles 89
Figure 8.2 - Surface d'éclatements à 56 cycles en fonction de la catégorie de granulats 93
Figure 8.3 - Surface de dégarnissements à 56 cycles en fonction de la catégorie de granulats 94
Figure 8.4 - Perte de masse cumulative à 56 cycles en fonction de la catégorie de granulats 95
Figure 8.5 - Masse des débris cumulée (kg/m^2) des sources lavés et non lavés en fonction du nombre de cycles 96
Figure 8.6 - Comparaison des surfaces de dégarnissement et éclatement entre les sources lavées et non lavées 98

Figure 9.1 - Pertes aux essais de gel-dégel non confiné et micro-Deval de toutes les sources granulaires 99
Figure 9.2 - Limites du Tableau 12 de la normes CSA A23.1 et pertes aux essais de gel-dégel non confiné et micro-Deval de toutes les sources granulaires 101
Figure 9.3 - Résumé du programme expérimental des six phases de cette partie de la recherche 108
Figure 9.4 - Résultats moyens des débris massiques à 56 cycles en fonction de la source granulaire et de l'emplacement dans la chambre froide 110

Figure 9.5 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 1 110
Figure 9.6 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 1 111
Figure 9.7 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulat de la source 12 (catégorie 1) 112
Figure 9.8 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulat de la source 3 (catégorie 2) 112
Figure 9.9 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulat de la source 8 (catégorie 3) 113
Figure 9.10 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 2 114
Figure 9.11 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 2 115
Figure 9.12 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 3 116
Figure 9.13 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 3 117
Figure 9.14 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 4 118
Figure 9.15 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 4 119
Figure 9.16 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 5 120
Figure 9.17 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 5 121
Figure 9.18 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 6 122
Figure 9.19 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 6 123

Figure 10.1 - Cycles de température admissibles pour une chambre d'écaillage 126
Figure 10.2 - Débris massiques en fonction des cycles d'écaillage pour les six laboratoires 128

Figure 11.1 - Influence du lavage du gros granulat sur la masse des débris après 56 cycles 131
Figure 11.2 - Influence du lavage sur les surfaces de dégarnissement et d'éclatement des sources granulaires 1, 2, 4, 7, 8 et 9 132
Figure 11.3 - Intérieur de l'enceinte d'écaillage de l'université de Sherbrooke [31]. 133
Figure 11.4 - Masse des débris en fonction des pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné (les cylindres bleus sont les résultats du CRIB Laval et les cylindres gris sont ceux du CRIB-Sherbrooke) 136
Figure 11.5 - Surface d'éclatement en fonction des pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné (les cylindres bleus sont les résultats du CRIB Laval et les cylindres gris sont ceux du CRIB-Sherbrooke) 137
Figure 11.6 - Surface de dégarnissement en fonction des pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné (les cylindres bleus sont les résultats du CRIB Laval et les cylindres gris sont ceux du CRIB-Sherbrooke) 138
Figure 11.7 - Aspect visuel et masse des débris en fonction de la source granulaire et des pertes aux essais de gel-dégel et micro-Deval. 139
Figure 11.8 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et de la perte à l'essai de gel-dégel non confiné 140
Figure 11.9 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et de la perte à l'essai micro-Deval 141
Figure 11.10 - Aspect visuel et surface d'éclatement en fonction de la perte au gel-dégel non confiné 142
Figure 11.11 - Surface de dégarnissement en fonction de la perte à l'essai micro-Deval 143
Figure 11.12 - Aspect visuel et somme des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction de la somme des pertes au gel-dégel et micro-Deval 144
Figure 11.13 - Aspect typique de la fissuration périphérique de dalles de béton contenant des granulats gélifs (D-Cracking) [30]. 145
Figure 11.14 - Aspect visuel des plaques après 56 cycles de gel-dégel en fonction d'un classement par ordre décroissant du pourcentage de surface d'éclatement (plaques provenant du groupe de sept sources granulaires testées à l'Université de Sherbrooke) 146

Figure 11.15 - Relation entre la surface d'éclatement et la perte à l'essai de gel-dégel non-confiné pour toutes les sources granulaires 147
Figure 11.16 - Relation entre la surface d'éclatement et la perte à l'essai micro-Deval pour toutes les sources granulaires 148
Figure 11.17 - Relation entre la surface d'éclatement et la somme des pertes aux essai micro-Deval et de gel-dégel non confiné, pour toutes les sources granulaires 149
Figure 11.18 - Surfaces d'éclatement des sources granulaires qui sont conformes aux exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 150
Figure 11.19 - Surfaces d'éclatement des sources granulaires qui sont conformes aux exigences des notes du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 152
Figure 11.20 - Surfaces d'éclatement des sources granulaires qui ne sont pas conformes aux exigences des notes du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 153
Figure 11.21 - Comparaison entre les valeurs du Nombre pétrographique (NP) obtenues selon la méthode décrite dans la norme CSA A23.2-15A (2019) et les surfaces d'éclatements déterminées lors de l'essai d'écaillage. A & B. Tous les granulats étudiés avec une valeur limite de surface d'éclatements de 2,5% (A) ou 2,0% (B). C & D. Granulats de types calcaires/dolomies avec une valeur limite de surface d'éclatements de 2,5% (C) ou 2,0% (D).). 159
Figure 11.22 - Comparaison entre le pourcentage de particules médiocres/nuisibles au sein des matériaux granulaires de type calcaire/dolomie et % de surface d'éclatements obtenu à l'essai d'écaillage. 160
Figure 11.23 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et du calibre du gros granulat 161
Figure 11.24 - Surface de dégarnissement en fonction de la source granulaire et du calibre du gros granulat 162
Figure 11.25 - Surface d'éclatement en fonction de la source granulaire et de la qualité de la matrice cimentaire 162
Figure 11.26 -Masse des débris en fonction de la source granulaire et de la qualité de la matrice cimentaire 163
Figure 11.27 - Surfaces de dégarnissement fonction de la source granulaire et de la qualité de la matrice cimentaire 164
Figure 11.28 - Surfaces d'éclatement en fonction de la source granulaire et de la qualité de la matrice cimentaire 165
Figure 11.29 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et du facteur d'espacement 166
Figure 11.30 - Masse des débris en fonction du facteur d'espacement et de l'utilisation d'un géotextile en fond de moule. 167

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 - Dimension nominale maximale du granulat de 10 mm [20] 21
Tableau 3.2 - Dimension nominale maximale du granulat de 14 mm [20] 21
Tableau 3.3 - Dimension nominale maximale du granulat de 20 mm [20] 21
Tableau 3.4 - Variation des essais d'abrasion micro-Deval interlaboratoires [22] 25
Tableau 3.5 - Masse minimale des échantillons d'essai [24] 26
Tableau 3.6 - Exemple de la perte de masse pondérée [24] 27
Tableau 3.7 - Perte massique au gel-dégel après 5 cycles [25] 28
Tableau 3.8 - Caractéristique d'une surface écaillée - mortier de surface [27] 30
Tableau 3.9 - Limites de substances nuisibles* et propriétés physiques des granulats [20, 24] 33
Tableau 3.10 - Caractéristiques d'une surface écaillée - cône d'éclatement [27] 34

Tableau 5.1 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 1 39
Tableau 5.2 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 2 40
Tableau 5.3 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 3 41
Tableau 5.4 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 4 42
Tableau 5.5 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 5 43
Tableau 5.6 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 6 44
Tableau 5.7 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 7 45
Tableau 5.8 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 8 46
Tableau 5.9 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 9 47
Tableau 5.10 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 10 48
Tableau 5.11 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 11 49
Tableau 5.12 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 12 50
Tableau 5.13 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 13 51
Tableau 5.14 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 14 52
Tableau 5.15 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 15 53
Tableau 5.16 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 16 54
Tableau 5.17 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 17 55
Tableau 5.18- Principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication de la source granulaire Disponible à l'Université de Sherbrooke 56
Tableau 5.19- Sources granulaires incluses dans les trois catégories 57

Tableau 6.1 - Granulométrie, module de finesse, densité SSS et absorption du granulat fin utilisé à l'Université de Sherbrooke 58
Tableau 6.2 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 1 60
Tableau 6.3 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 2 62
Tableau 6.4 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 3 64
Tableau 6.5 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 4 65
Tableau 6.6 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 5 67
Tableau 6.7 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 6 68
Tableau 6.8 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis - Catégorie 1- Propriétés intrinsèques supérieures (CRIB Laval) 69
Tableau 6.9 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis - Catégorie 2- Propriétés intrinsèques intermédiaires (CRIB Laval) 70
Tableau 6.10 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis - Catégorie 3-Propriétés intrinsèques inférieures (CRIB Laval) 70
Tableau 6.11 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis - Granulats Lavés (CRIB Laval) 71

Tableau 7.1 - Procédure de gâchage (CRIB Laval) 74
Tableau 7.2 - Cycle de gel-dégel typique chambre écaillage (CRIB Laval) 79

Tableau 8.1 - Masse des débris cumulative et résultats d'analyse d'image (dégarnissements et éclatements) pour les granulats de catégorie 1 (propriétés intrinsèques supérieures) 90
Tableau 8.2 - Masse des débris cumulative et résultats d'analyse d'image (dégarnissements et éclatements) pour les granulats de catégorie 2 (propriétés intrinsèques intermédiaires) 91
Tableau 8.3 - Perte de masse cumulative et résultats d'analyse d'image (dégarnissements et éclatements) pour les granulats de catégorie 3 (propriétés intrinsèques inférieures) 92
Tableau 8.4 - Masse des débris cumulative et résultats d'analyse d'image (dégarnissements et éclatements) pour les granulats lavés 97

Tableau 9.1 - Caractérisation complète selon le tableau 12 de la norme CSA A23.1 des sources granulaires étudiées 100
Tableau 9.2 - Catégories et choix des sept sources granulaires pour les phases 1 à 6 103
Tableau 9.3 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 1 104
Tableau 9.4 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 2 105
Tableau 9.5 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 3 105
Tableau 9.6 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 4 106
Tableau 9.7 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 5 107
Tableau 9.8 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 6 107
Tableau 9.9 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 1 109
Tableau 9.10 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 2 114
Tableau 9.11 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 3 115
Tableau 9.12 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 4 118
Tableau 9.13 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 5 120
Tableau 9.14 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 6 122

Tableau 10.1 - Formulation et propriétés du béton durci pour l'échange interlaboratoires 124
Tableau 10.2 - Propriétés à l'état frais du béton de type V-S 124
Tableau 10.3 - Conditionnement des plaques d'écaillage 125
Tableau 10.4 - Caractéristiques des chambres d'écaillage - Informations de 2020 126
Tableau 10.5 - Caractéristiques des chambres d'écaillage - Informations du MTQ de 2019 127
Tableau 10.6 - Résultats finaux de l'échange interlaboratoires de 2020 128
Tableau 10.7 - Résultats finaux de l'échange interlaboratoires de 2016 130

Tableau 11.1 - Principales caractéristiques physiques de l'enceinte d'écaillage de l'Université de Sherbrooke [31] 134
Tableau 11.2 - Résumé du classement des sources granulaires selon les critères proposés 155
Tableau 11.3 - Principaux faciès présents dans les matériaux granulaires utilisés dans ce projet. Les cellules colorées correspondent à des calcaires et dolomies. Les types de roches susceptibles d'engendrer des éclatements lors de cycles de gel-dégel, de même que le pourcentage de particules médiocres ou nuisibles sont identifiés en rouge pour chacune des descriptions pétrographiques. Les valeurs aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné sont également incluses pour chaque matériau granulaire 156
Tableau 11.4 - Limites suggérées du Nombre Pétrographique (NP) pour les catégories de qualité des granulats (selon la norme CSA A23.2-15A-2019). 158
Tableau 11.5 - Grille comparative de l'aspect visuel de la surface des plaques d'écaillage 169

LISTE DE ACRONYMES ET DES SYMBOLES

AEA :	Agent Entraineur d'Air
GU :	General Use
GUb-SF :	General Use blended with Silicate Fume
GUb-F/SF :	General Use blended with Fly ash and Silicate Fume
GUb-S/SF :	General Use blended with Slag and Silicate Fume
$\overline{L}$:	Facteur d'espacement
$\overline{L}_{crit}$:	Facteur d'espacement critique
PNS :	Polynaphtalènes Sulfonates
SP :	Superplastifiant

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Au Québec et plus généralement au Canada, les conditions climatiques et météorologiques mettent à l'épreuve les structures extérieures en béton. Les températures pouvant atteindre les -30°C entraînent un gel en surface qui contribue à dégrader le béton notamment par l'écaillage de la surface du béton. Il se traduit par l'effritement de la surface en écailles ou flocons de petites dimensions. L'utilisation de sels de déglaçage est fortement liée au processus d'écaillage. Ce type de dégradation est très courant dans les régions rencontrant des cycles de gel-dégel comme au Canada. L'écaillage peut être couramment observé sur des structures en béton tels les ponts, les viaducs, les pavages ou encore les trottoirs.

L'écaillage des surfaces de béton dégrade principalement l'aspect esthétique des ouvrages. Il n'y a que très rarement des problèmes structuraux découlant de l'écaillage. Cependant, selon sa sévérité, il peut contribuer à la corrosion des barres d'armature en diminuant l'épaisseur de recouvrement.

Plusieurs essais et méthodes ont été développés pour tenter de prédire et quantifier les risques d'écaillage d'un béton en service. Les trois principales méthodes d'essais utilisées au Québec sont décrites par les normes ASTM C672, BNQ 2621-905 Annexe B et CSA A23.2-22C. Ces procédures d'essais accélérées ont pour but de quantifier relativement rapidement la susceptibilité à l'écaillage d'un béton exposé à des cycles répétés de gel-dégel en présence de sels fondants.

La durabilité des ouvrages en béton est une préoccupation constante pour le Ministère des transports du Québec (MTQ). Les conditions hivernales rigoureuses du Québec occasionnent des problématiques complexes en relation avec la technologie du béton. En 2014, un projet de recherche a été élaboré en collaboration avec l'Université de Sherbrooke en vue de corroborer les spécifications techniques énoncées dans les normes et le cahier des charges et devis généraux du MTQ vis-à-vis de la résistance à l'écaillage du béton soumis au gel-dégel et à l'action des sels déglaçant. Le projet, intitulé « Recommandations sur la limite du facteur d'espacement, la température critique lors de l'hydratation du ciment et la résistance à l'écaillage du béton des ouvrages d'art », a permis d'appuyer les critères de durabilité exigés concernant le réseau d'air de la pâte de ciment. Il a aussi été démontré que la qualité des granulats utilisés dans la fabrication du béton peut avoir une certaine incidence sur l'endommagement du béton causé par le phénomène d'écaillage (*pop-out*, éclatement de certaines particules du gros granulat localisées à une faible profondeur sous la surface exposée). Les conséquences de cet endommagement sont :

- Esthétiques, car l'éclatement des granulats diminue significativement les qualités visuelles des surfaces de béton.
- Fonctionnelles, car l'éclatement des granulats peut s'ajouter à l'endommagement du mortier, ce qui contribue à augmenter l'écaillage, la rugosité de la surface et diminue l'épaisseur de l'enrobage des aciers d'armature (si présents).
- Réglementaires et normatives, car actuellement, les méthodes d'essais normalisés concernant la résistance à l'écaillage du béton ne prennent pas en compte les contributions individuelles de l'endommagement des granulats et du mortier.

Le projet réalisé précédemment s'étant limité à deux sources granulaires, l'aspect à approfondir est la conséquence du changement de source de granulats en relation avec la performance du béton vis-à-vis de l'écaillage. En considérant les différentes sources de granulats du Québec, certaines d'entre elles sont plus ou moins aptes à fournir une bonne performance dans le béton. Il faut donc caractériser la performance

du béton avec un éventail de granulats aux caractéristiques différentes. Également, la précision et la répétabilité de l'essai d'écaillage réalisé selon la norme BNQ 2621-905 sont actuellement inconnues. Il y aurait donc lieu de caractériser la variabilité de cet essai.

En 2014, le MTQ a modifié ses références techniques pour les granulats à béton, passant d'une norme BNQ à la norme CSA A23.1 « Béton/Constituants et exécution des travaux ». Lors de ce passage, certains aspects techniques de la norme CSA posaient des problèmes de viabilité, ce qui a conduit à des discussions avec l'industrie et à la création du chantier au sujet des granulats. La qualité des granulats a une conséquence sur le comportement du béton sous l'aspect durabilité. Un projet de recherche est nécessaire pour revalider la position du MTQ et proposer des avenues de solutions techniques. De nouvelles recommandations pourraient produire des impacts à très long terme sur les exigences du MTQ puisque celui-ci est en processus de se positionner à ce sujet.

1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Le projet a comme principal objectif de déterminer l'influence de certaines caractéristiques physico-mécaniques des gros granulats sur l'endommagement de bétons lorsqu'ils sont utilisés dans des bétons subissant des cycles de gel-dégel et en présence de sels de déglaçage. Plus spécifiquement, l'étude souhaite déterminer s'il existe une relation entre les pertes à l'essai micro-Deval et à l'essai de gel-dégel non confiné et la susceptibilité du gros granulat à l'éclatement et au dégarnissement lors de l'essai d'écaillage en laboratoire selon la procédure normalisée BNQ 2621-905 Annexe B. L'analyse de la réponse de ces deux essais (micro-Deval et gel-dégel non confiné) et la durabilité à l'écaillage du béton permettra de déterminer s'il est pertinent de définir des pertes maximales (micro-Deval et gel-dégel non confiné) applicables aux gros granulats utilisés pour produire des bétons sévèrement exposés aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déglaçage.

Pour atteindre cet objectif principal, cette étude comporte les objectifs spécifiques suivants :

1. Déterminer l'influence de certaines caractéristiques intrinsèques des granulats (minéralogie, absorption, résistance aux chocs, résistance à l'usure par frottement, etc.) sur leur résistance à l'éclatement lorsqu'ils sont exposés à des cycles de gel-dégel dans un état non confiné.

    - Identifier 17 sources granulaires représentatives des matériaux granulaires communément utilisés dans la fabrication des bétons au Québec. Les sources granulaires seront choisies pour bien représenter la diversité des gros granulats à béton au Québec du point de vue de leurs caractéristiques intrinsèques de performance et sur la base de leur composition minéralogique (calcaires, dolomies, granites, basalte).
    - Déterminer les caractéristiques des granulats (minéralogie, absorption, micro-Deval, Los Angeles, stabilité au $MgSO_4$, gel-dégel non confiné).
    - Étudier les relations entre les caractéristiques intrinsèques des granulats et la tenue au gel-dégel non confiné.

2. Développer et valider une procédure expérimentale pour quantifier spécifiquement l'endommagement (éclatement et dégarnissement) des particules de gros granulat lors d'un essai normalisé d'écaillage accéléré en laboratoire.

- Définir les critères d'identifications d'un éclatement (*pop-out*) et d'un dégarnissement.
- Valider / perfectionner la méthode optique développée lors du projet de recherche précédent.

3. Déterminer l'influence de certaines caractéristiques des granulats (minéralogie, microstructure, porosité, friabilité, résistance aux chocs, résistance à l'usure par frottement, tenue au gel-dégel non confiné) sur leur résistance à l'éclatement lorsqu'ils sont utilisés dans des bétons exposés à des cycles de gel-dégel et des sels de déglaçages.

    - Sélectionner un sous-ensemble de granulats à partir des résultats obtenus lors des essais de la résistance à l'éclatement en condition non confiné.
    - Étudier la résistance à l'écaillage des bétons fabriqués avec ces granulats en considérant les variables suivantes : type et source du gros granulat, type de béton, facteur d'espacement, type de liant, dimension maximale du gros granulat.
    - Analyser la variabilité de l'essai d'écaillage selon la procédure BNQ 2621-905 (sensibilité face à l'opérateur et interlaboratoires).

4. Proposer des seuils de performance applicables aux caractéristiques intrinsèques des granulats pour atteindre une résistance à l'écaillage acceptable en fonction de l'usage, notamment sur la base de l'endommagement par éclatement des particules de gros granulats.

    - Évaluer la pertinence de proposer un critère d'acceptation d'un granulat basé sur la réponse d'un essai d'écaillage accéléré tel que l'essai NQ 2621-905 (prise en compte de la masse des débris, évaluation visuelle, quantification du nombre ou de la surface totale des éclatements).
    - Évaluer la pertinence de proposer un critère d'acceptation d'un granulat sur la base de la réponse à un essai de gel-dégel non confiné.
    - Évaluer la pertinence de proposer un critère d'acceptation d'un granulat sur la base d'un essai de type micro-Deval.

1.3 STRUCTURE DU PROGRAMME DE RECHERCHE

Le programme de recherche comporte les tâches suivantes dans le but d'atteindre les objectifs généraux et spécifiques cités précédemment :

Tâche 1 - Revue de la documentation scientifique

Une revue de la documentation scientifique portant sur les mécanismes d'endommagement du béton par l'écaillage et plus spécifiquement sur les mécanismes d'endommagement des gros granulats dans un béton exposé à des cycles répétés de gel-dégel en présence de sels de déglaçage.

Elle inclura aussi un résumé des essais présentement utilisés au Canada pour déterminer les limites d'acceptabilité des granulats pour un usage dans le béton, tels que les essais micro-Deval (CSA A23.2-23A) et la résistance au gel-dégel non confiné (CSA A23.2-24A).

Tâche 2 - Choix, échantillonnage et caractérisation des sources granulaires

En collaboration avec le MTQ, un choix de sources granulaires représentatives sera effectué de façon à couvrir l'éventail des faciès pétrographiques des granulats couramment utilisés au Québec dans la fabrication de bétons. Un total de 17 différentes sources granulaires sera sélectionné et échantillonné sur le territoire québécois. Un examen pétrographique détaillé sera réalisé par le secteur béton de la direction des matériaux d'infrastructure (DMI) du MTQ sur chacun des granulats suite auquel les propriétés intrinsèques de ces derniers seront évaluées à l'aide des essais normalisés couramment utilisés pour la caractérisation des granulats à béton (micro-Deval, Los Angeles, gel-dégel non confiné, absorption - Tableau 12, CSA A23.1). Ces essais seront réalisés par deux laboratoires mandataires ainsi que par le secteur sols et granulats de DMI du MTQ. Une étude de la réponse des différents granulats aux essais sera effectuée de façon à établir des liens entre la minéralogie et les différents faciès pétrographiques et les valeurs obtenues aux essais de gel-dégel non confiné et des essais de micro-Deval et Los Angeles.

Tâche 3 - Perfectionner et valider une procédure expérimentale par analyse d'images pour quantifier l'endommagement par éclatement et dégarnissement des gros granulats

La susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement des sources granulaires sera quantifiée à l'aide d'une procédure expérimentale par analyse d'images qui sera améliorée et validée dans le cadre de cette étude. Les bétons analysés auront été soumis à la procédure NQ 2621-905 et des mesures des éclatements seront réalisées après 7, 21, 35 et 56 cycles. Une évaluation de la répétabilité sera également effectuée en reproduisant certains essais et en accomplissant les analyses par un opérateur à l'Université de Sherbrooke et par un à l'Université Laval.

Tâche 4 - Mesure de la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec les 17 sources granulaires sélectionnées

Cette tâche sera accomplie à l'Université Laval. Les 17 sources de gros granulats choisies seront utilisées pour fabriquer des bétons de type V-S. Tous les bétons seront ensuite soumis à l'essai d'écaillage selon la procédure NQ 2621-905. Les bétons seront produits avec le même type de liant ternaire, le même granulat fin et les mêmes adjuvants que ceux utilisés par l'Université de Sherbrooke. Pour chaque béton, on mesurera la masse des débris et aussi l'intensité des éclatements et des dégarnissements en utilisant la procédure développée à la tâche 3. Cette série d'essais permettra d'avoir une réponse à l'écaillage pour toutes les sources granulaires. Les résultats expérimentaux permettront d'étudier les relations entre la réponse à l'écaillage et certaines propriétés intrinsèques du gros granulat (pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné). Elle permettra aussi d'évaluer la répétabilité réelle de l'essai d'écaillage car sept bétons de cette série seront aussi testés à l'Université de Sherbrooke. Ils seront refaits dans les malaxeurs de Sherbrooke, soumis aux cycles de gel-dégel dans l'enceinte de Sherbrooke et mesurés par son personnel technique (masse de débris, éclatements et dégarnissements).

Cette tâche comportera aussi l'analyse des effets d'un lavage du gros granulat sur la durabilité à l'écaillage. Quatre sources granulaires, particulièrement « sales » (i.e. forte quantité de poussières accolées aux particules), seront sélectionnées pour refaire les bétons et les essais d'écaillage après lavage de ces gros granulats.

Tâche 5 - Étude de la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec un sous-ensemble de sept sources granulaires

Cette tâche sera accomplie à l'Université de Sherbrooke. Elle vise à comprendre les effets de plusieurs paramètres pouvant influencer la durabilité à l'écaillage du béton et du gros granulat. En raison de contraintes logistiques et temporelles, seulement sept sources granulaires seront utilisées pour fabriquer les bétons de cette tâche. Les sources granulaires seront choisies et classées en trois niveaux de performance (inférieur, intermédiaire et supérieur) sur la base de leurs caractéristiques intrinsèques (pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné). Les mêmes matériaux que ceux utilisés par l'Université Laval seront utilisés (type de liant, sable et adjuvants). Tous les essais d'écaillage seront réalisés selon la procédure NQ 2621-905. Le suivi des éclatements et des dégarnissements sera effectué selon la procédure d'analyse d'image développée lors de la tâche 3. Le programme expérimental de cette tâche est divisé en six phases de travail :

Phase 1 - Étude de la durabilité à l'écaillage de bétons de type V-S produits avec des gros granulats de calibre 5-20 mm

- Essais avec les sept sources granulaires de calibre 5-20 mm.
- Analyse de la variabilité de la masse de débris et influence du positionnement des plaques dans l'enceinte de gel-dégel.
- Étude de la relation entre la réponse à l'écaillage (béton et gros granulat) et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné.
- Étude de la cinétique du développement des dégarnissements et des éclatements lors de l'essai d'écaillage.

Phase 2 - Étude de l'influence de la dimension maximale du gros granulat sur la durabilité à l'écaillage du béton et du gros granulat

- Essais avec quatre sources granulaires de calibre 5-14 mm.
- Analyse de l'influence de la taille maximale du gros granulat en comparaison avec les résultats de la phase 1 obtenus avec un calibre de 5-20 mm.
- Étude de la relation entre la réponse à l'écaillage (béton et gros granulat) et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné.
- Étude de la cinétique du développement des dégarnissements et des éclatements lors de l'essai d'écaillage.

Phase 3 - Étude de l'influence d'une matrice de béton à haute performance (Type XIII) sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat

- Essais avec deux sources granulaires de calibre 5-14 mm.
- Analyse de l'influence d'une matrice de performance élevée en comparaison avec les résultats de la phase 2 obtenus avec une matrice de type V-S et un calibre de 5-14 mm.
- Étude de la relation entre la réponse à l'écaillage (béton et gros granulat) et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné.

Phase 4 - Étude de l'influence d'une matrice de béton de faible performance (Type F2) sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat

- Essais avec deux sources granulaires de calibre 5-20 mm.
- Analyse de l'influence d'une matrice de faible performance en comparaison avec les résultats de la phase 1 obtenus avec une matrice de type V-S.
- Étude de la relation entre la réponse à l'écaillage (béton et gros granulat) et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné.

Phase 5 - Étude de l'influence d'une variation des caractéristiques du réseau d'air sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement

- Essais avec une source granulaire de calibre 5-20 mm.
- Analyse de l'influence du facteur d'espacement des bulles d'air en comparaison avec les résultats de la phase 1 obtenus avec la même matrice de type V-S.
- Étude de la relation entre la réponse à l'écaillage (béton et gros granulat) et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné.

Phase 6 - Étude l'influence du géotextile en fonds de moule sur la résistance à l'écaillage d'un béton de Type C2

- Essais avec une source granulaire de calibre 5-20 mm.
- Analyse de l'influence du géotextile pour deux valeurs du facteur d'espacement des bulles d'air.
- Étude de la relation entre la réponse à l'écaillage (béton et gros granulat) et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné.

Tâche 6 - Étude de la variabilité interlaboratoires de l'essai d'écaillage BNQ 2621-905

Cette tâche sera accomplie à l'Université de Sherbrooke. Elle vise à évaluer la variabilité de la réponse à l'essai d'écaillage (masse des débris à 56 cycles) de la procédure BNQ 2621-905 - Annexe B. Le programme expérimental comporte les actions suivantes :

- Essais avec une source granulaire de calibre 5-20 mm disponible à l'Université de Sherbrooke.
- Six paires de plaques d'écaillage fabriquées à l'Université de Sherbrooke.
- Envoie d'une paire de plaques à chacun des six laboratoires participants à l'étude interlaboratoires.
- Étude de la variabilité de la réponse à l'essai d'écaillage (masse des débris après 56 cycles).

1.4 ÉQUIPE DE RECHERCHE

Ce projet de recherche a été conçu et réalisé par une équipe de 13 personnes qui regroupe des chercheurs universitaires, des professionnels et des assistants de recherche, des étudiants de 2e et 3e cycles et des personnels techniques.

Richard Gagné est professeur titulaire au département de génie civil et de génie du bâtiment de l'Université de Sherbrooke. Il est chercheur au sein du Centre de recherche sur les infrastructures de béton (CRIB). C'est un spécialiste reconnu de la durabilité des bétons et notamment de leur durabilité à l'écaillage en

présence de cycles de gel-dégel et de sels fondants. Il est coresponsable de la direction scientifique de ce projet de recherche.

Benoît Fournier est professeur titulaire au département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval. Il est chercheur au sein du Centre de recherche sur les infrastructures de béton (CRIB). Il est un expert reconnu au niveau de la caractérisation des matériaux granulaires constituant le béton et leurs effets sur la durabilité du béton. Il est coresponsable de la direction scientifique de ce projet de recherche.

Nicolas Le Piquet a complété une maîtrise au département de génie civil et de génie du bâtiment de l'Université de Sherbrooke. Dans le cadre de son projet de maîtrise, il a accompli une grande partie des travaux expérimentaux et de l'analyse des résultats de ce projet de recherche. Il a été codirigé par les deux chercheurs responsables de ce projet de recherche.

Olivier Bonneau est professionnel de recherche au département de génie civil et de génie du bâtiment de l'Université de Sherbrooke. Il a participé à l'encadrement scientifique de la maîtrise de Nicolas Le Piquet. Il a été responsable de la coordination technique et administrative des opérations d'échantillonnage des sources granulaires et des travaux de recherche expérimentaux. Il contribué à la réalisation du programme expérimental et notamment pour la réalisation et l'analyse des essais interlaboratoires.

Mathieu Thomassin-Mailhot travaille comme professionnel de recherche au Centre de recherche sur les infrastructures en béton depuis 2010. Il a coordonné l'ensemble des essais d'écaillage au laboratoire de l'Université Laval dans le cadre du projet avec l'aide des étudiants et personnel technique.

Andreia Rodrigues est stagiaire postdoctorale au département de géologie et génie géologique avec l'équipe de Benoit Fournier depuis 2019. Elle a contribué à la coordination des essais sur granulats et à l'identification des surfaces d'éclatements et dégarnissements dans le cadre des essais d'écaillage à l'Université Laval.

Rajko Vojnovic était technicien au département de génie civil et de génie du bâtiment de l'Université de Sherbrooke. Il a effectué, avec une grande minutie, tous les essais d'écaillage réalisés à l'Université de Sherbrooke.

Nicolas Simard, technicien au département de génie civil et de génie du bâtiment de l'Université de Sherbrooke. Il a participé à l'échantillonnage des sources granulaires en conduisant le camion de l'Université de Sherbrooke et en remplissant les barils de granulats.

Corentin Flauw Robic a complété une maîtrise au département de génie civil et de génie du bâtiment de l'Université de Sherbrooke. Il a contribué à la réalisation des bétons fabriqués à l'Université de Sherbrooke.

Thomas Duplessis, Eliot Poiré et Alexandre Desbiens ont contribué à la réalisation des divers essais au laboratoire (granulats et béton) à titre d'auxiliaires de recherche au 1er cycle au département de géologie et génie géologique de l'Université Laval.

Gaëlle St-Louis et Loraine Tremblay, stagiaires à l'Université Laval, ont participé à la planification et à la réalisation de l'échantillonnage des sources granulaires sur les sites de prélèvement à titre d'auxiliaires de recherche au 1er cycle au département de géologie et génie géologique.

2 CONTENU ET STRUCTURE DU DOCUMENT

Ce chapitre a pour but d'expliquer la structure du document, pour faciliter sa consultation et pour mieux faire comprendre le cheminement global de l'analyse scientifique.

L'introduction (chapitre 1) explique le contexte de l'étude et les étapes de la démarche expérimentale et scientifique. Après le présent chapitre sur le *contenu et la structure du document* (chapitre 2), ce rapport comporte les chapitres 3 à 11 et se termine par la conclusion (chapitre 12).

Le chapitre 3 - État *de l'art sur la durabilité des gros granulats dans les bétons exposés à des cycles de gel-dégel en présence de sels fondants* est une revue de la documentation scientifique sur les mécanismes d'écaillage de la matrice cimentaire et de l'endommagement des particules de gros granulat dans les bétons exposés à des cycles de gel-dégel en présence de sels fondants. Ce chapitre présente aussi des données techniques sur l'essai micro-Deval et l'essai de gel-dégel non confiné. Il se termine par une présentation et une description d'une procédure pour quantifier, par analyse d'images, la surface d'éclatement des particules du gros granulat lors d'un essai d'écaillage en laboratoire.

Le chapitre 4 - *Choix et échantillonnage des sources granulaires* explique les processus décisionnel et logistique utilisés pour choisir et échantillonner les 17 sources granulaires mises à l'essai dans le cadre cette étude. Pour des raisons de confidentialité, l'identification des sources granulaires est non nominative. Un nombre spécifique a été attribué arbitrairement à chacune des sources granulaires.

Le chapitre 5 - *Propriétés intrinsèques et caractéristiques de fabrication des sources granulaires* présente la caractérisation détaillée des 17 sources granulaires (granulométrie, pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné, densité, absorption, minéralogie et nombre pétrographique).

Le chapitre 6 - *Caractérisation des bétons* présente la caractérisation détaillée de tous les mélanges de bétons fabriqués à l'Université de Sherbrooke et à l'Université Laval. Il contient une description des matériaux (granulat fin, liants et adjuvants), la formulation détaillée des bétons et les propriétés des bétons frais et durcis. Au total, 42 formulations de béton ont été produites et incluses dans l'analyse globale de ce projet de recherche. Pour des raisons de confidentialité, les informations nominatives des matériaux ne sont pas incluses dans ce document.

Le chapitre 7 - *Procédures expérimentales* détaille l'ensemble des procédures expérimentales utilisées pour la réalisation du programme expérimental réalisé à l'Université de Sherbrooke et à l'Université Laval : gâchage des bétons, fabrication et mûrissement des éprouvettes, enceintes de gel-dégel et essais d'écaillage, procédure de quantification des éclatements et des dégarnissements.

Le chapitre 8 - *Résultats des essais d'écaillage réalisés avec toutes les sources granulaires* présente et fait une première analyse des résultats des essais d'écaillage avec les 17 sources granulaires. Ces essais ont été faits par l'équipe de l'Université Laval. Ils ont permis de quantifier l'évolution de la masse des débris, des éclatements et des dégarnissements lors des 56 cycles de gel-dégel. Les éclatements et dégarnissement ont été quantifiés par analyse d'images.

Le chapitre 9 - *Résultats des essais d'écaillage réalisés avec le sous-ensemble de sept sources granulaires* présente et fait une première analyse des résultats des essais d'écaillage avec le sous-ensemble de sept sources granulaires testées à l'Université de Sherbrooke. L'analyse est organisée selon les six phases

suivantes : 1- Étude de la durabilité à l'écaillage de bétons de Type V-S; 2- Étude de l'influence de la dimension maximale du gros granulat sur la durabilité à l'écaillage du béton et du gros granulat; 3- Étude de l'influence d'une matrice à haute performance sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat; 4- Étude de l'influence d'une matrice de béton de faible performance sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat; 5- Étude de l'influence d'une variation des caractéristiques du réseau d'air sur la susceptibilité à l'écaillage et à l'éclatement; 6- Étude de l'influence du géotextile en fonds de moule sur la résistance à l'écaillage d'un béton de Type C2.

Le chapitre 10 - *Tests d'écaillage interlaboratoires* présente l'analyse de la variabilité interlaboratoires de de la réponse à l'écaillage (masse des débris après 56 cycles) de l'essai d'écaillage réalisé selon la procédure de l'Annexe B de la norme BNQ 2621-905.

Le chapitre 11 - *Analyse globale des résultats* présente l'analyse globale de tous les résultats de cette étude. Cette analyse est basée sur les résultats obtenus de tous les participants de l'étude (Université de Sherbrooke, Université Laval, MTQ et laboratoires mandataires). Elle permet de dégager et de supporter les principales conclusions et recommandations découlant de cette étude.

La conclusion (chapitre 12) présente la liste des principales conclusions et recommandations découlant des objectifs spécifiques de cette recherche.

3 ÉTAT DE L'ART SUR LA DURABILITÉ DES GROS GRANULATS DANS LES BÉTONS EXPOSÉS À DES CYCLES DE GEL-DÉGEL EN PRÉSENCE DE SELS FONDANTS

3.1 MECANISMES D'ACTION DU GEL-DEGEL

3.1.1 Écaillage

L'écaillage fait partie, avec la fissuration interne, des deux phénomènes de dégradation du béton associés aux cycles de gel-dégel. Seul le premier mode de dégradation du béton est présenté ci-après, car le second ne concerne pas l'étude proposée dans ce mémoire. Néanmoins, il est important de préciser que l'écaillage n'est pas le seul mécanisme affectant les bétons exposés aux cycles de gel-dégel.

Tout d'abord, il est important de présenter le phénomène principalement étudié dans ce document : l'écaillage. Celui-ci tient son nom de la dégradation de la surface des bétons. L'écaillage ne peut apparaître que sous certaines conditions environnementales : le béton doit subir des cycles de gel-dégel tout en étant en présence de sels fondants. Sans ces deux paramètres, l'écaillage ne se produit généralement pas.

L'écaillage se présente par un décollement de fines couches de pâte de ciment ou de mortier. L'épaisseur des débris ne dépasse pas quelques millimètres. De plus, le phénomène d'écaillage ne concerne que la « peau » du béton, soit les premiers millimètres de béton sous la surface (Figure 3.1). Il s'agit généralement d'un problème esthétique et non structurel. Néanmoins, dans certains cas, les dégradations dues à l'écaillage sont telles qu'elles peuvent accélérer d'autres processus comme la pénétration d'ions susceptibles de corroder les barres d'armature en diminuant l'épaisseur d'enrobage en surface du béton [1].

Le phénomène d'écaillage apparaît notamment lors des hivers les plus rigoureux, et principalement à la surface des bétons en contact direct avec les sels de déglaçage (tabliers de ponts, trottoirs en béton, pavages en béton …). Cependant, il est possible de l'observer sur des surfaces verticales. Cela est principalement dû à la projection des sels lors du passage de véhicules sur les chaussées, ou sur les trottoirs. Comme le montre la Figure 3.1, la zone du béton la plus détériorée est proche des bords. En s'éloignant, l'écaillage est moins important car le béton a été moins exposé aux sels déglaçants.

Figure 3.1 - Exemple de surface en béton présentant des dégradations par écaillage

La Figure 3.2 présente le même processus de dégradation, mais dans le cas de cycles de gel-dégel accélérés en conditions de laboratoire. Ces deux figures (Figures 3.1 et 3.2) montrent qu'autant pour des plaques exposées en conditions accélérées que pour des plaques en conditions naturelles, une dégradation de la pâte de ciment et du mortier est très facilement observable. De plus, les deux bétons présentent des granulats qui apparaissent en surface, et même des cratères correspondant à des granulats ayant totalement disparus.

Figure 3.2 - Exemple de plaque d'écaillage dégradée en conditions de laboratoire

De nombreux modèles ont été développés à ce jour pour expliquer le mécanisme responsable de l'écaillage [4]. Cependant, aucun n'a pu expliquer tous les cas d'écaillage connus. Ainsi, il semblerait que l'origine de l'écaillage résulte d'une combinaison de plusieurs de ces modèles. Deux d'entre eux sont présentés dans les paragraphes suivants. Ces modèles sont davantage expliqués pour la pâte de ciment, mais ils sont également applicables pour les gros granulats.

3.1.1.1 Modèle des pressions hydrauliques

Ce modèle a été proposé par Powers en 1949 [3]. La pression hydraulique apparaît lorsque l'eau présente dans la pâte de ciment gèle. Si la pâte est saturée en eau, l'augmentation du volume de cette dernière lors du gel (de l'ordre de 9 %) entraîne une migration vers les pores non saturés. Powers a utilisé la loi des écoulements en milieu poreux de Darcy pour mettre en avant les pressions engendrées par ce phénomène. Powers a déterminé la longueur maximale (L_{max}) du trajet de l'eau entre deux bulles d'air afin que la pression hydraulique engendrée ne soit pas supérieure à la résistance maximale supportable par le béton [4].

Ainsi, lorsque l'écart entre les bulles d'air L est plus importante que L_{max}, les contraintes en traction que subit le béton sont supérieures à sa résistance, qui est relativement faible, entrainant une fissuration de la pâte de ciment. La demi-distance moyenne entre les bulles d'air est couramment référencée dans la technologie du béton comme le facteur d'espacement $\bar{L}$. La Figure 3.3 représente schématiquement cette distance entre deux bulles d'air.

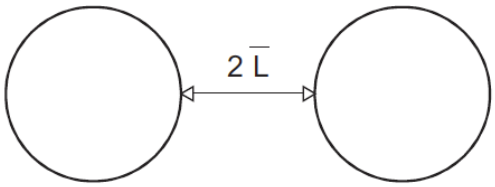


Figure 3.3 - Distance 2 $\bar{L}$ séparant deux bulles d'air [2,3]

Cependant, ce modèle de Powers [3] n'est pas suffisant pour comprendre le phénomène d'écaillage entièrement. En effet, il s'est appuyé sur le fait que l'eau soit expulsée des pores capillaires mais expérimentalement l'inverse est observé [4]. L'eau migre des pores des C-S-H (Silicate de Calcium Hydraté) vers les capillaires. Cette théorie a néanmoins pu mettre en avant l'importance du facteur d'espacement et de la qualité du réseau d'air.

3.1.1.2 Modèle des pressions osmotiques

Suite au modèle précédent incomplet, Powers a développé un second modèle avec l'aide de Helmuth [2]. Il s'agit du modèle qui traduit le mieux les actions des sels déglaçants [4]. Leur présence en surface explique les détériorations très présentes dans cette zone. En effet, les sels de déglaçage sont dissous dans l'eau et pénètrent le béton en surface en remplissant les bulles d'airs et les pores capillaires non saturés. À l'inverse du premier modèle, la concentration élevée en ion de l'eau des pores engendre une diminution de la température de fusion, ce qui devrait avoir pour effet de diminuer les pressions hydrauliques. Cependant, ce n'est pas ce qui est observé [1].

Dans les gros pores, le gel de l'eau tend à augmenter la concentration en ions de l'eau qui est encore liquide alors que dans les petits pores, l'eau, qui a une température de fusion plus basse comme l'a montré l'étude de Defay et co. [5], a toujours la même concentration. Ainsi, l'eau tend à migrer des petits pores vers les

plus gros pores, et non pas l'inverse comme présenté dans le modèle des pressions hydrauliques. La Figure 3.4 présente cet effet.

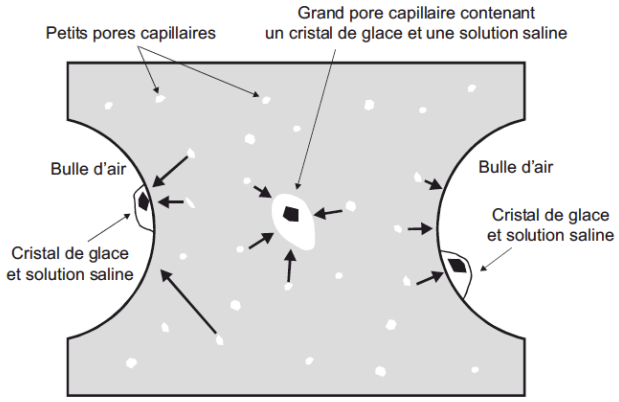


Figure 3.4 - Représentation schématique du modèle des pressions osmotiques [4]

L'effet de la concentration en ion est maximal pour une concentration d'environ 3%. La Figure 3.5 illustrant le niveau de dégradation à l'écaillage en fonction de la concentration saline dans la solution montre bien un pic à une concentration saline de 3 %.

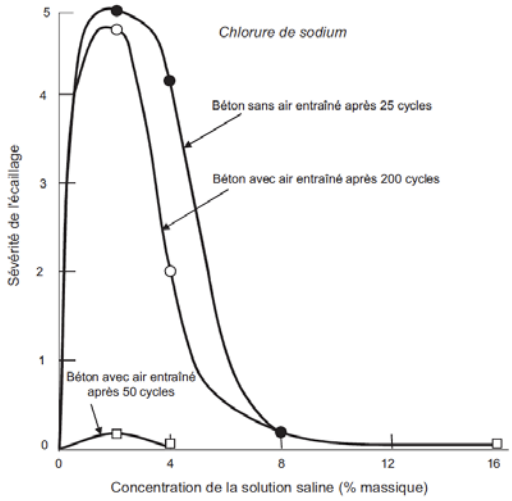


Figure 3.5 - Influence de la concentration en sel sur la dégradation à l'écaillage [4]

Ce modèle de pression osmotique permet d'expliquer les dommages engendrés proches de la surface, car les pressions osmotiques y sont plus importantes (la concentration saline y est plus importante). Néanmoins, le modèle n'explique pas pourquoi le béton peut écailler même en présence d'un produit qui n'augmente pas de volume en gelant comme l'alcool. Ainsi, l'écaillage pourrait résulter d'une combinaison des deux modèles précédents [6]. Cela permet de comprendre les dégradations qui sont maximales pour des concentrations ioniques de 3 à 6%. Pour des concentrations plus faibles, les pressions hydrauliques sont prédominantes tandis que pour une concentration de plus en plus élevée, les pressions hydrauliques diminuent du fait de la diminution du point de fusion de l'eau. La figure 3.6 montre l'effet des deux modèles

sur les pressions internes du béton. Il est ainsi possible de valider la combinaison des pressions hydrauliques et osmotiques.

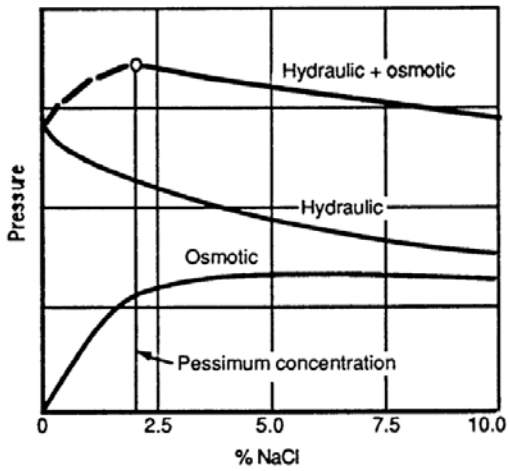


Figure 3.6 - Pression interne au béton en fonction de la concentration en NaCl [6]

3.1.2 Paramètres d'influence

3.1.2.1 Volume d'air et facteur d'espacement

Afin de protéger les bétons exposés aux sels déglaçants, il faut garantir un réseau d'air de bonne qualité pour respecter le $\bar{L}$ critique. En effet, ce réseau de bulles d'air peut diminuer les pressions hydrauliques et osmotiques dans la pâte de ciment hydraté. L'utilisation d'un agent entraîneur d'air permet d'augmenter le volume d'air contenu dans le béton. La Figure 3.7 montre qu'avec un volume d'air compris entre 4 et 6 % le béton est mieux protégé contre l'écaillage.

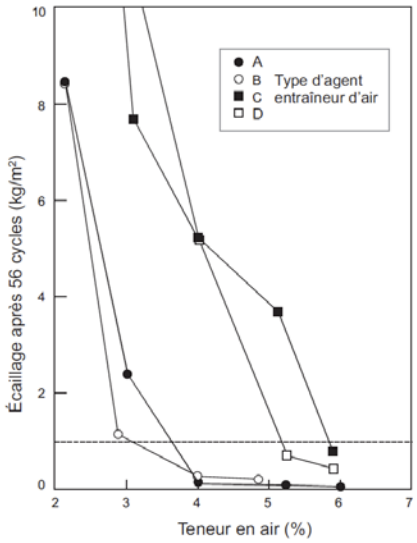


Figure 3.7 - influence du volume d'air entraîné et du type d'agent entraîneur d'air [7]

Néanmoins, ce n'est pas suffisant pour garantir la protection contre l'écaillage [7]. En effet, même si différents agents entraîneur d'air (AEA) peuvent procurer un volume d'air équivalent, la taille des bulles ne sera pas identique entre chaque béton, ce qui explique les écarts présents sur la Figure 3.7 entre les différents AEA. Aucune valeur critique du volume d'air ne garantit la disparition du phénomène d'écaillage [7].

Le béton contenant des bulles d'air de dimensions plus faibles sera mieux protégé [1]. Le facteur d'espacement permet de considérer la dimension des bulles pour la résistance à l'écaillage (Figure 3.8). La diminution du facteur d'espacement montre une amélioration de la résistance à l'écaillage, mais ne présente pas une valeur limite garantissant un écaillage nul. Pour des bétons avec des valeurs de rapport eau/ciment (E/C) usuelles (0,40 - 0,50), un facteur d'espacement inférieur à 200 µm permet d'offrir une durabilité à l'écaillage suffisante. Cette valeur a pu être vérifiée par des bétons en conditions réelles [1].

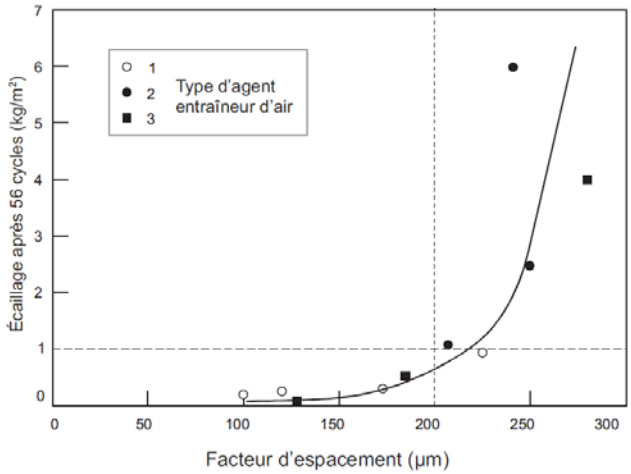


Figure 3.8 - Influence du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage (E/C de 0,43 à 0,47) [7]

3.1.2.2 Rapport E/C

Le rapport eau/ciment (E/C) est fortement lié à l'air présent dans le béton. Plus celui-ci est élevé, plus la porosité capillaire est importante (mais ce n'est pas le seul paramètre influant sur la porosité d'un béton). Une diminution du rapport E/C entraîne une diminution de la porosité mais aussi de la dimension des pores capillaires de la pâte de ciment hydraté. Par conséquent, la quantité d'eau gelable contenu dans ces pores est également réduite, ce qui a pour effet d'améliorer la résistance à l'écaillage [1].

Cependant, une augmentation du E/C provoque une augmentation de la perméabilité et non un facteur d'espacement plus faible. Ainsi, il est important d'utiliser des AEA afin de diminuer le facteur d'espacement et atteindre une valeur limite. Celle-ci est de 250 µm pour un E/C inférieur à 0,5 [9]. En effet, il faut atteindre des valeurs très basses de E/C, en dessous de 0,25, pour ne plus nécessiter un AEA et résister à l'écaillage en présence de sels fondants [1].

Ainsi, un réseau d'air de mauvaise qualité ($\bar{L}$ >250 µm) nécessite un rapport E/C maximum de 0,35 pour diminuer grandement le phénomène d'écaillage. Il est à noter que certains ciments (les plus fins) permettent d'améliorer la résistance à l'écaillage. Les bétons produits avec des ciments ayant une finesse élevée présentent une meilleure imperméabilité et donc résistent mieux au phénomène d'écaillage.

3.1.2.3 Fumée de silice

L'ajout de fumée de silice n'a pas un impact négatif sur l'écaillage du béton sous certaines conditions. En effet, il faut s'assurer que moins de 10% du ciment ne soit remplacé par l'ajout cimentaire [1]. De plus, un rapport eau/liant (E/L) inférieur à 0,3 permet d'obtenir un réseau d'air de qualité suffisante pour ne pas dégrader la résistance à l'écaillage recherchée. Avec l'utilisation de fumée de silice, il faut toujours garantir un bon réseau d'air grâce à l'utilisation d'un AEA par exemple, même si certains bétons à haute performance (BHP) peuvent s'en passer (si le E/L est inférieur à 0,25) [8].

3.1.2.4 Cendres volantes

Le cas des cendres volantes est un point important pour la résistance à l'écaillage. En effet, son utilisation diminue la durabilité du béton exposés aux sels déglaçants dans des conditions de laboratoires. Cependant, il n'y a pas encore suffisamment de connaissances sur le phénomène pour le comprendre et expliquer cette contre-performance.

Quelques hypothèses ont été mises en avant. La première est la durée de mûrissement : celle-ci doit être suffisamment longue, supérieure à 28 jours, pour permettre à la cendre volante de participer à la production d'hydrates. Une deuxième hypothèse vient compléter cette dernière : le béton contenant des cendres volantes aurait une perméabilité plus importante en surface, ce qui amplifierait les mécanismes de fissuration et d'écaillage. Pour revenir à la période de mûrissement, l'hydratation plus rapide du ciment Portland par rapport à la réaction pouzzolanique de la cendre volante justifierait la nécessité d'allonger le mûrissement. De plus, la réaction pouzzolanique de la cendre volante près de la surface est très sensible à la carbonatation. Si au jeune âge (avant 14 jours) un phénomène de carbonatation se produit à la surface, la réaction pouzzolanique de la cendre volante sera bloquée. Elle ne peut donc pas participer à la densification de la pâte près de la surface [9, 10, 11, 12, 13].

Même s'il est certain que les performances face à l'écaillage diminuent avec l'ajout de cendre volante, ces pertes de durabilité varient en fonction des caractéristiques physico-chimiques de la cendre utilisée. Afin de pallier ces problèmes, il faut garantir une très bonne qualité de réseau d'air ($\overline{L}$ <200 µm) et limiter le taux de remplacement à des valeurs inférieures à 30 %. Dans le cas de taux de remplacement de plus de 50 %, même un réseau d'air de qualité ($\overline{L}$ inférieur à 250 µm) et un faible E/L (inférieur à 0,3) ne garantissent pas une bonne résistance à l'écaillage.

3.1.2.5 Laitiers de haut fourneau

L'utilisation de laitier de haut fourneau pour des bétons exposés aux cycles de gel-dégel et aux sels déglaçants est actuellement peu connue. En effet, seules quelques recherches ont été réalisées mais sont pour certaines contradictoires [14, 15]. Certaines études précisent que l'utilisation de laitier diminue la résistance à l'écaillage, tandis que d'autres présentent une amélioration de la durabilité. Tout comme pour les bétons contenant de la cendre volante, les bétons contenant des laitiers de haut fourneau présentent des résultats mal corrélés entre les essais en laboratoires et les performances en service [32,33]. La durabilité en service étant généralement supérieure à la durabilité mesurée en laboratoire.

Un point a cependant été soulevé concernant la diminution de la durabilité : la carbonatation de la pâte de ciment serait une cause possible [16]. En effet, l'utilisation de laitier produit une moins grande quantité de CH ce qui diminue la capacité tampon de la pâte et favorise une carbonatation plus rapide. Près de la surface, l'hydratation du laitier n'est plus activée par un pH élevé, ce qui augmente la porosité capillaire.

3.2 LES GROS GRANULATS

3.2.1 Caractéristiques et définition

Les gros granulats de densité normale doivent se composer de pierre concassée, de graviers naturels, de laitier de haut-fourneau refroidi à l'air, ou d'un mélange de ceux-ci et être conformes à la norme CSA A23.1 [17]. De nombreuses caractéristiques permettent de définir la qualité des gros granulats. Il y a notamment :

- La résistance à l'abrasion (micro-Deval, Los Angeles) ;
- Le module élastique ;
- La macrotexture et microtexture de surface (rugosité) ;
- La minéralogie ;
- La teneur en alcalis, en chlorures et les impuretés ;
- La résistance aux cycles de gel-dégel dans un état non-confiné ;
- La résistance aux cycles de mouillage-séchage ;
- La résistance à l'impact (Los Angeles) ;
- L'absorption ;
- La porosité [18].

Certaines de ces caractéristiques sont particulièrement importantes en regard de la résistance à l'écaillage. La résistance à l'abrasion et la résistance aux cycles de gel-dégel dans un état non confiné et la porosité en font partie [18]. Une conséquence de l'utilisation de gros granulats de qualité insuffisante est l'apparition de « pop-out » en surface.

3.2.2 Influence des gros granulats sur l'écaillage

Les gros granulats ont une structure physique se rapprochant de celle des bétons : une porosité qui peut être plus ou moins saturée. Cela justifie le fait que certains mécanismes de destruction par le gel appliqués au béton sont applicables aux gros granulats. Néanmoins, à l'inverse du béton, dans le cas des granulats, cette porosité ne peut être ni contrôlée, ni modulée.

Un des facteurs les plus importants pour caractériser si un granulat est gélif ou non est son degré de saturation. Si celui-ci est supérieur à 90 % [4, 34], les pores du granulat ne sont pas suffisants pour contenir l'expansion de l'eau gelée. Par conséquent, cette eau excédentaire doit être expulsée. Cela entraîne des pressions hydrauliques pouvant engendrer la destruction du granulat si cette pression est supérieure à la résistance en tension de ce granulat. De plus, une dimension maximale du granulat existe pour lui permettre de pouvoir expulser l'eau avant que la pression ne devienne supérieure à sa résistance. La dimension limite n'est pas la même pour des degrés de saturation différents [1, 4]. Ceci explique qu'un gros granulat présente un risque plus important à la destruction qu'un sable face au gel. De plus, un granulat de plus grande dimension a un volume plus important et libère donc une plus grande quantité d'eau dans le béton.

La quantité d'eau absorbable par le granulat se traduit par le volume de pores du granulat. La vitesse d'absorption est quant à elle traduite par la dimension des pores du granulat et leur connectivité [1, 4]. Le volume total de pores présente également la capacité du granulat à être saturé plus ou moins rapidement dans un milieu humide.

La durabilité du granulat a été estimée à partir de la dimension et la répartition des pores dans le cas de 30 granulats différents [4]. La Figure 3.9 montre le volume de pores en fonction du diamètre médian de ces pores. Elle permet également de démontrer que les granulats ayant une porosité inférieure à 0,015 cm^3/g ont généralement une meilleure durabilité face au gel, quel que soit le diamètre médian de la porosité.

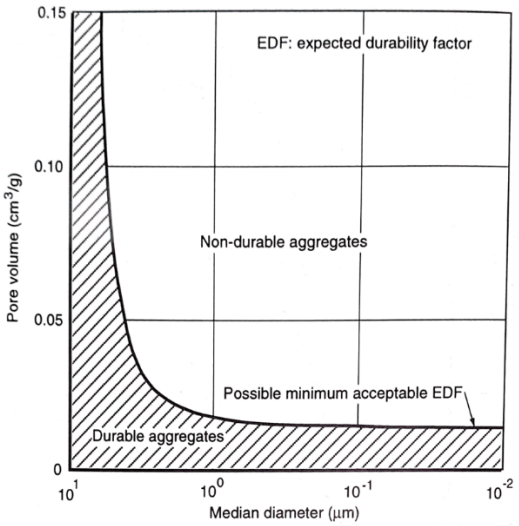


Figure 3.9 - Combinaisons du volume total des pores et du diamètre médian des pores pour des granulats durables et non-durables [4]

Dans le cas d'un granulat poreux et saturé en eau soumis au gel, des pressions hydrauliques intenses se créent et peuvent mener à la détérioration de ce granulat. S'il se présente dans un milieu confiné comme le béton, il peut générer des cratères en surface (ou « pop-out ») en arrachant le mortier ou la pâte de ciment situés au-dessus de lui suite à des pressions hydrauliques trop élevées (Figure 3.10).

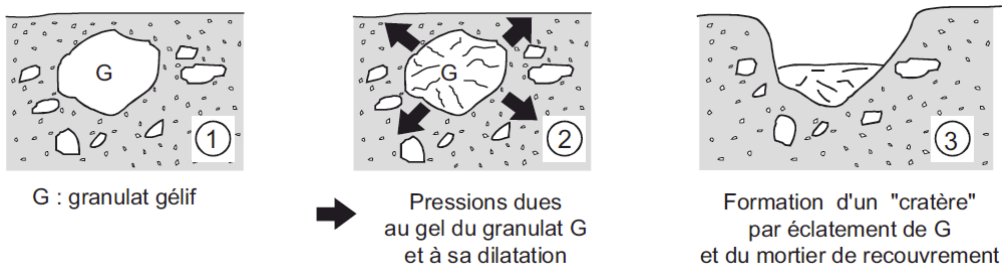


Figure 3.10 - Fissuration d'un granulat dans un béton exposé au gel [1]

Dans le béton, l'environnement entourant le granulat (le mortier) peut accélérer ce processus de détérioration. En effet, par exemple, l'eau expulsée par le granulat gélif peut être bloquée par l'imperméabilité de la pâte de ciment et engendrer une augmentation des pressions hydrauliques dans la zone de transition entre le granulat et la pâte de ciment hydraté [4]. L'effet inverse est également remarqué. Un béton avec un réseau d'air de meilleure qualité (pores plus petits et bien répartis) peut diminuer les contraintes et donc prévenir la dégradation du granulat et du béton.

Il a ainsi été relevé trois types de granulats répondant à ce mécanisme de gel [1, 4] :

- Les granulats à forte porosité et forte perméabilité. Ils sont peu gélifs grâce à leur capacité à expulser rapidement l'eau des pores. Le milieu environnant doit pouvoir dissiper cette eau supplémentaire (la pâte de ciment hydraté doit être relativement perméable) ;
- Les granulats à faible porosité et faible perméabilité. Ils ne peuvent pas contenir une quantité d'eau importante et donc rejettent peu d'eau dans le béton. Ces granulats affectent donc très peu la résistance du béton au gel-dégel ;
- Les granulats à porosité et perméabilité intermédiaires. Dans un béton de bonne qualité (peu perméable), ces granulats ne sont que rarement saturés. Néanmoins, si ces granulats doivent libérer de l'eau dans ce type de béton, il y aura d'autant plus de contrainte hydraulique dans la zone de transition que le béton est imperméable, même s'il possède de l'air entraîné car les bulles d'air sont dans la pâte et non à l'interface pâte-granulat.

Un projet de recherche réalisé à l'Université de Sherbrooke a cherché à démontrer l'influence des gros granulats sur la résistance à l'écaillage [19]. Il a été choisi de comparer un granulat de référence et un granulat dit marginal (granulat dont les caractéristiques physico-mécaniques sont à la limite de la conformité réglementaire). Après avoir développé une méthode pour quantifier le nombre de « pop-out » apparus, les deux bétons ont pu être comparés.

Ces recherches ont pu montrer expérimentalement qu'une plus grande quantité de débris d'écaillage a été obtenue avec le mélange de béton incorporant le granulat aux propriétés marginales, et ce pour un même facteur d'espacement. De plus, à masses de débris égales, les bétons avec le granulat de référence ont montré un facteur d'espacement plus élevé (Figure 3.11). Il en a été déduit que malgré un meilleur réseau

d'air dans la pâte de ciment, si les granulats ne sont pas de qualité suffisante, ceux-ci éclatent et forment des « pop-out », et donc de l'écaillage. Cela a pu être démontré en analysant le pourcentage de la surface de granulats éclatés en proportion de la surface totale du béton exposé (Figure 3.12).

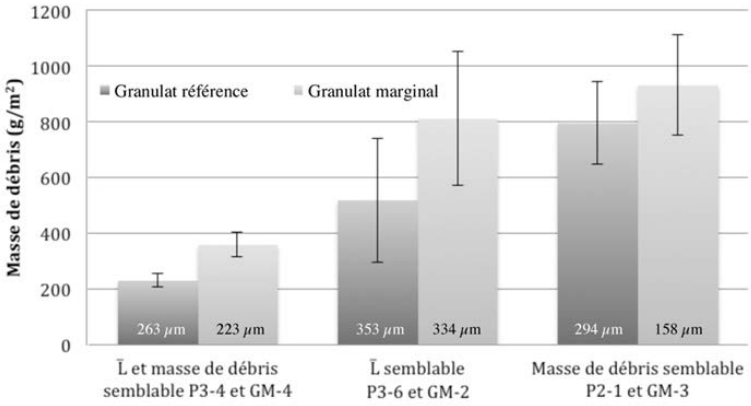


Figure 3.11 - Influence du gros granulat marginal sur la masse de débris en fonction de trois types de comparaisons par rapport au granulat de référence [19]

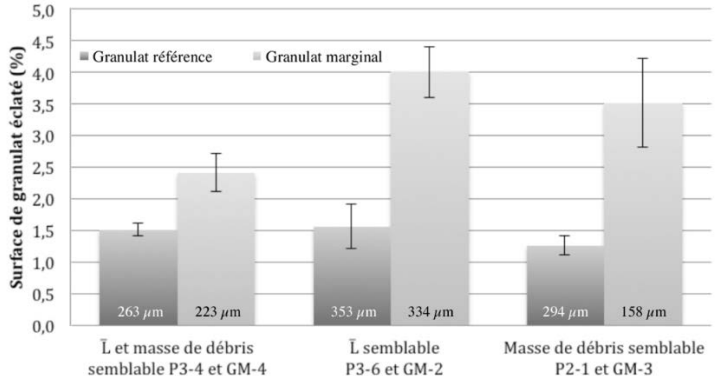


Figure 3.12 - Comparaisons des surfaces de granulats éclatés lors de l'écaillage pour les deux granulats [19]

3.3 ESSAIS ET NORMES

3.3.1 Essai micro-Deval

La méthode d'essai micro-Deval présentée dans cette section fait référence à la procédure d'essai normalisée CSA A23.2-29A 2014 [20]. L'essai micro-Deval détermine la résistance à l'usure par attrition du gros granulat dans un appareil portant le même nom. Il consiste à mesurer la résistance et la durabilité à l'abrasion et au broyage par l'action de billes en acier, le tout en présence d'eau.

Un échantillon de granulat est préparé selon les exigences des Tableaux 3.1 à 3.3, donnant la granulométrie requise pour l'essai. La masse totale de l'échantillon doit être de 1500 ± 5 g. Ces tableaux indiquent la

masse et la granulométrie des échantillons à utiliser en fonction de la dimension maximale nominale du gros granulat.

Tableau 3.1 - Dimension nominale maximale du granulat de 10 mm [20]

Tamisat, mm	Retenu, mm	Masse, g
10	5	1500

Tableau 3.2 - Dimension nominale maximale du granulat de 14 mm [20]

Passant, mm	Retenu, mm	Masse, g
14	10	750
10	5	750

Tableau 3.3 - Dimension nominale maximale du granulat de 20 mm [20]

Tamisat, mm	Refus, mm	Masse, g
20	14	750
14	10	750

Par la suite, la charge abrasive est mesurée : il faut 5000 ± 5 g de billes d'acier de 9,5 ± 0,5 mm de diamètre. L'échantillon est placé dans la jarre avec 2,0 L d'eau et la charge abrasive. La jarre est ensuite soumise à un mouvement rotatif à une vitesse de 100 tr/min pendant 2 heures (Figure 3.13). À la fin de l'essai, l'échantillon est lavé, séché à l'étuve et tamisé au travers d'un tamis de 1,25 mm à mailles carrées. La quantité de matière passant le tamis est exprimée en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon. Il est ainsi obtenu la perte massique par essai micro-Deval.

Figure 3.13 - Appareil micro-Deval [19]

Comme il a été précisé précédemment, l'intérêt de cet essai est de fournir des informations sur la capacité du granulat à résister à l'abrasion, de définir sa dureté, sa durabilité et sa résistance sous l'effet des intempéries. De plus, il indique la résistance du granulat face à la dégradation lors de la manutention, du malaxage ou du compactage. L'utilisation d'eau pour l'essai est justifiée par la chute de résistance des granulats à l'état mouillé. Cette perte est quantifiable grâce à l'essai micro-Deval.

L'essai micro-Deval a été développé dans les années 1960 en France et conçu avec des équipements provenant de l'industrie du broyage [21]. Il n'a été instauré au Canada, notamment au Québec et en Ontario, que plus tard afin de compenser les manques de précision des essais Los Angeles et de résistance aux sulfates de magnésium. En effet, la précision du test micro-Deval est meilleure que ce dernier [21, 35]. De plus, une corrélation a été démontrée entre les deux essais (Figure 3.14).

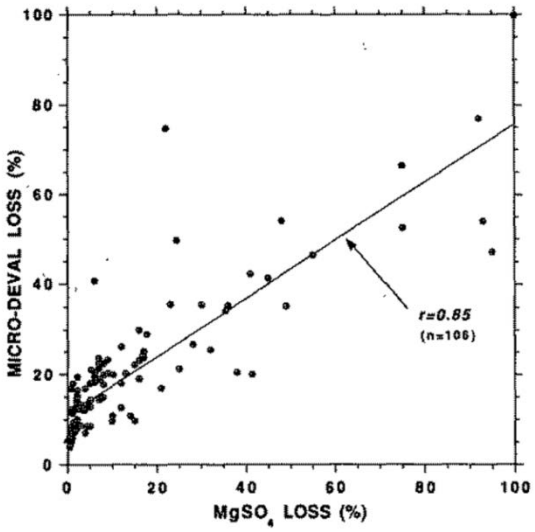


Figure 3.14 - Corrélation entre l'essai micro-Deval et l'essai de durabilité au sulfate de magnésium [21]

L'essai micro-Deval permet également de différencier la performance des granulats pour leur utilisation. En effet, en combinaison avec le nombre pétrographique, l'essai micro-Deval est un bon indicateur de performance, comme le montre la Figure 3.15.

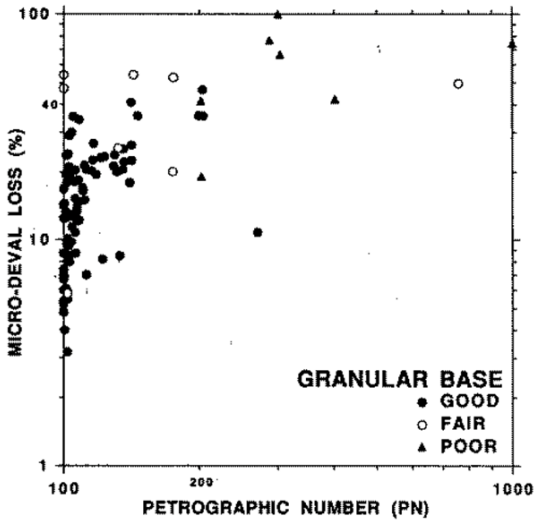


Figure 3.15 - Champ des indices de performance des granulats en fonction du nombre pétrographique et de la perte massique à l'essai micro-Deval [21]

Comme indiqué précédemment, la présence d'eau lors de l'essai permet de mieux évaluer les performances du granulat car cela est plus représentatif des conditions d'utilisation dans le béton où les granulats sont placés dans un milieu humide [22].

L'étude réalisée par C. Rogers et al. (2003) [22] a également permis d'évaluer la précision de l'essai micro-Deval en réalisant des essais inter-laboratoires. Les Figures 3.16 et 3.17 montrent une variabilité moins importante pour l'essai micro-Deval que pour l'essai de résistance à la désagrégation aux sulfates de magnésium (à noter que les deux essais ont été réalisés par les mêmes laboratoires).

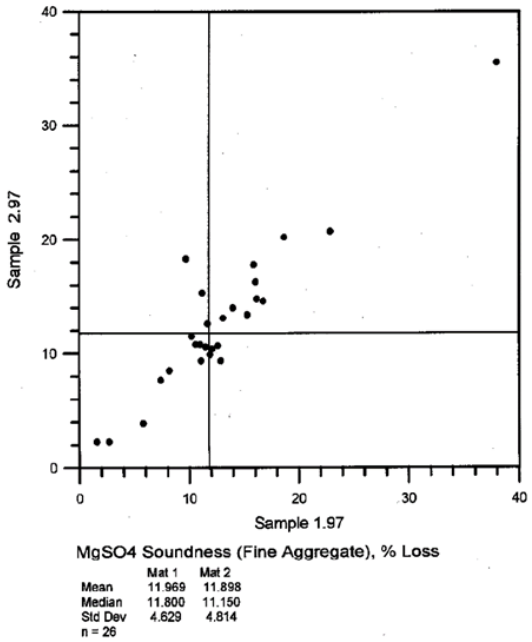


Figure 3.16 - Résultats inter-laboratoires des essais de durabilité au sulfate de magnésium [22]

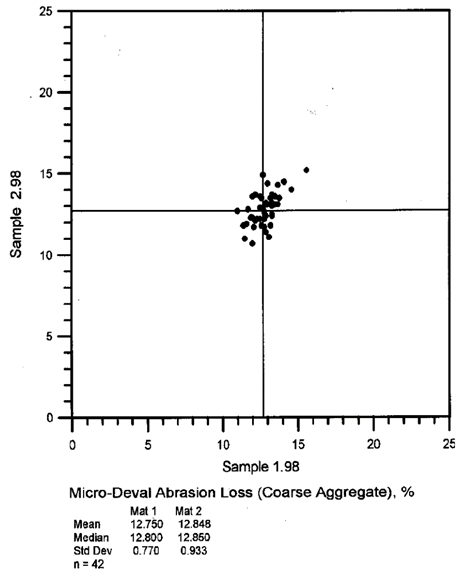


Figure 3.17 - Résultats inter-laboratoires des essais micro-Deval pour des gros granulats [22]

Il a été démontré que plus la perte massique est faible, plus la variation entre les laboratoires est importante. Le Tableau 3.4 présente ces résultats.

Tableau 3.4 - Variation des essais d'abrasion micro-Deval interlaboratoires [22]

Micro-Deval Abrasion Test	various aggregates mean loss (%)	coefficient of variation[1] (1S%)	d2s%[1]
Fine aggregate	38	2.6	7
	20	4.1	12
	19	5.6	16
	10.5	6.0	17
	7	8.1	23
Coarse aggregate	21	5.3	15
	17	5.6	15
	12	6.4	18
	5	10.0	28

[1] d2s% = that value, as a per cent of the mean micro-Deval loss of the aggregate, which will not be exceeded by the difference in results obtained in two different laboratories on samples of the same aggregate, 95% of the time.

Cependant, l'essai micro-Deval n'est pas parfait. Il rencontre des écarts de mesures dans le cas des granulats fins (Figure 3.18). Cela est dû à la finesse du sable utilisé pour l'essai [21, 23].

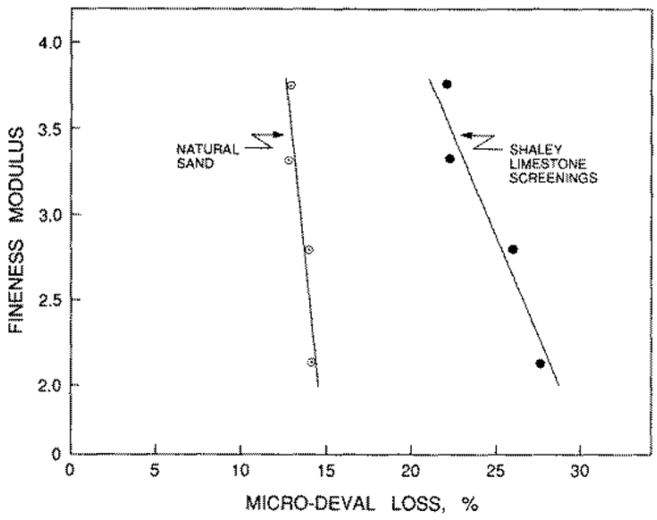


Figure 3.18 - Perte à l'essai micro-Deval en fonction du module de finesse [23]

Cela se traduirait par une influence de l'énergie mise en œuvre lors de l'essai (vitesse de rotation, masse des billes d'acier) et la taille des particules testées [23]. En effet, la norme précise une durée applicable aux appareils calibrés pour une vitesse de rotation de 100 ± 5 tr/min. Une limite de tours serait plus précise et permettrait de limiter les variations et améliorer la précision [22]. Il faut noter que l'essai micro-Deval CSA demande des essais minimalement mensuels avec un matériau de référence. Ces essais permettent de déterminer la quantité de tours acceptables pour que la précision de l'essai soit augmentée.

3.3.2 Essai de gel-dégel non confiné

La méthode d'essai de gel-dégel non confiné présentée dans cette section fait référence à la procédure d'essai normalisée CSA A23.2-24A 2014 [24]. L'essai de gel-dégel non confiné permet de quantifier la désintégration de granulats après les avoir soumis à 5 cycles de gel-dégel dans une solution de chlorure de sodium. Chaque cycle dure 24 h. La perte massique est calculée à l'aide d'une analyse granulométrique à la fin des 5 cycles.

La première étape consiste à préparer la solution et l'échantillon. Il faut pour cela dissoudre 30 g de chlorure de sodium dans 1 L d'eau et remuer jusqu'à dissolution complète du solide. Remuer de nouveau avant son utilisation. Ensuite, les granulats, séchés à l'étuve au préalable, sont tamisés pour obtenir la répartition massique donnée dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 - Masse minimale des échantillons d'essai [24]

Passant, mm	Retenu, mm	Masse, g
40	28	5000
28	20	2500
20	14	1250
14	10	1000
10	5	500

Les fractions de granulats sont placées dans des contenants de dimensions adaptées (Figure 3.19). Ils sont alors remplis par la solution de chlorure de sodium jusqu'à ce que les granulats soient entièrement immergés. Les contenants sont scellés et laissés à température ambiante durant 24 ± 2 heures.

Figure 3.19 - Échantillon de gel-dégel non confiné [19]

L'eau des contenants est drainée en renversant ces derniers sur un tamis de 5 mm pendant 5 s. Les granulats ne doivent pas sortir du contenant. Ils sont ensuite scellés et placés dans le congélateur en s'assurant que les contenants ne se touchent pas grâce à des diviseurs placés entre chaque contenant. La température du congélateur doit être de -18 ± 2°C pendant 16 ± 2 h. Puis ils sont laissés à dégeler durant 8 ± 1 h à température ambiante. Cela constitue un cycle. Cette étape est répétée 5 fois.

À la fin du dernier cycle, les granulats sont rincés à l'eau du robinet à 5 reprises en prenant soin qu'ils ne sortent pas du contenant. Ensuite, les contenants sont placés dans une étuve à 110 ± 5°C, jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Chaque fraction de granulat est tamisée pendant 3 minutes sur le même tamis utilisé pour préparer l'échantillon. Les masses de la fraction retenue et passante sont notées. Enfin, la perte pondérée est calculée comme suit :

- multiplier le pourcentage de retenu avec celui de passant pour chaque fraction ;
- faire la somme des produits et diviser par 100.
- Le résultat est le pourcentage moyen pondéré de perte de masse par gel-dégel. Le Tableau 3.6 montre un exemple de calcul.

Tableau 3.6 - Exemple de la perte de masse pondérée [24]

Fraction granulométrique, mm	Perte, %	Refus, %	Perte de masse moyenne pondérée
20 à 14	15,0	20,0	300
14 à 10	18,0	30,0	540
10 à 5	16,0	50,0	800
Total			1640

*Perte pondérée moyenne de masse par gel-dégel = 1640/100 = 16,4 %.

De nombreux paramètres peuvent influencer l'essai. Une étude de C.A Rogers et al. [25] a mis en avant plusieurs d'entre eux. Le premier est la concentration de la solution de chlorure de sodium utilisée. Ils ont pu vérifier qu'une concentration comprise entre 2 et 4% est plus sévère que pour des valeurs plus ou moins importantes. Ils en ont conclu qu'une concentration en ions chlore de 3% est la plus sévère (Tableau 3.7). Elle a donc été retenue pour normaliser l'essai.

De la même manière, le nombre de cycles de gel-dégel influence l'essai. Pour 10 cycles, les pertes sont environ 1,9 fois supérieures à celles d'un essai de 5 cycles. Cependant, 5 cycles ont été conservés dans la norme pour une question de durée de l'essai. De plus, la température minimale des cycles interfère sur les résultats de l'essai. La Figure 3.20 le montre. Les températures de -15 et -20°C entraînent des pertes massiques plus importantes.

Le test de gel-dégel non confiné possède une bonne précision inter-laboratoires [25]. Il peut également être corrélé au test de durabilité aux sulfates de magnésium mais est plus précis pour identifier les performances des granulats testés (Figure 3.21).

Tableau 3.7 - Perte massique au gel-dégel après 5 cycles [25]

ROCK TYPE	NaCl Concentration 0%	3%	5%	8%
Sandstone	3.4	4.9	2.9	1.7
Argillite	2.5	4.7	3.0	2.9
Diabase	1.4	0.5	0.8	0.4
Sandstone	1.1	10.3	2.7	0.7
Sandy Dolostone	6.7	27.8	24.5	10.6
Shaley Dolostone	4.4	67.3	61.6	34.3
Granite	0.4	1.1	0.4	0.7
Granite	1.2	1.4	3.1	1.8
Mica Schist	4.9	4.9	5.9	5.6
Dolostone	0.4	2.3	2.4	0.6
Shaley Dolostone	3.6	68.4	78.3	88.2
Limestone	3.0	33.0	23.1	15.0
Siltstone	6.3	38.5	41.5	21.5
Mica Schist	4.1	4.4	3.6	3.1
Shaley Dolostone	0.8	48.4	63.7	40.2
Shaley Dolostone	2.3	42.3	42.0	36.9
Limestone	5.3	11.4	9.5	4.4
Limestone	1.4	38.9	28.8	16.2
Sandstone	1.0	32.7	15.8	7.1
Limestone	1.7	42.8	35.6	14.7
Dolostone	1.0	1.5	1.3	0.3
Dolostone	0.1	10.0	6.2	3.4
Sandstone	3.1	30.6	14.1	10.2
Limestone	5.1	23.8	27.3	13.9
Limestone	1.9	7.1	4.5	3.6
MEAN LOSS	2.68	22.36	20.07	13.50

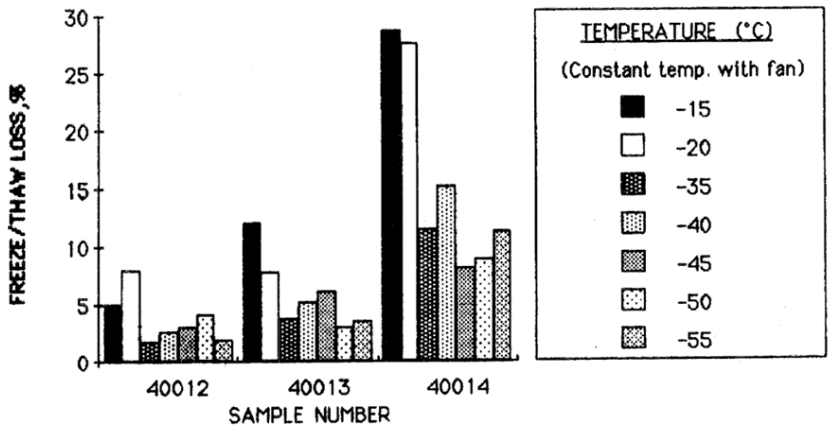


Figure 3.20 - Perte massique au gel-dégel en fonction de la température du congélateur [25]

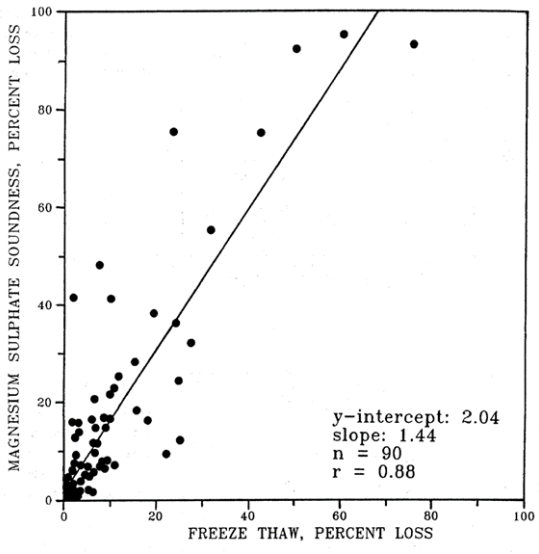


Figure 3.21 - Perte massique due au test de durabilité au sulfate de magnésium en fonction de la perte au gel-dégel [25]

3.3.3 Combinaison des résultats de la perte micro-Deval et de la perte au gel-dégel non confiné

L'essai de gel-dégel non confiné, tout comme l'essai micro-Deval, sont des essais qui tentent de reproduire l'effet de l'environnement et des sollicitations mécaniques sur la dégradation des granulats. Malgré de bonnes estimations des performances des granulats avec ces essais (micro-Deval et gel-dégel non confiné), ils ne peuvent être utilisés seuls car ils ont tous deux certaines difficultés à différencier les granulats marginaux des granulats de faible qualité [35]. Il est possible de réaliser des examens pétrographiques ou d'absorption d'eau par exemple, afin de mieux identifier la qualité des granulats [21, 35].

Ainsi, aucun essai utilisé seul ne permet d'estimer adéquatement la performance en service d'un granulat à béton. Il est nécessaire, pour tenter d'y parvenir, d'utiliser les résultats d'une combinaison d'essais. L'interprétation des résultats de ces essais devra notamment prendre en compte l'environnement dans lequel le granulat et le béton seront exposés.

3.3.4 Essai d'écaillage

Cet essai de durabilité fait l'objet des procédures d'essais normalisées CSA A23.2-22C 2014 [26] et BNQ 2621-905 Annexe B [27]. C'est ce dernier qui sera utilisé pour mesurer la durabilité à l'écaillage des bétons de cette étude. Cet essai a pour but de déterminer la résistance à l'écaillage d'une surface plane de béton en présence d'agents déglaçants et exposée à des cycles de gel-dégel. Il faut faire attention au fait qu'il ne s'agit pas d'un test sur la résistance du granulat; il s'agit bien d'un essai sur le béton dans sa globalité (granulat, pâte de ciment et zone de transition).

Avant de réaliser l'essai, la solution de chlorure de sodium doit être préparée de la même manière que pour l'essai de gel-dégel non confiné pour obtenir une concentration de 3,0% par masse dans de l'eau distillée. Le cadre d'étanchéité utilisé pour contenir la solution saline sur l'éprouvette d'essai peut être fabriquée dans différents matériaux : en caoutchouc rigide ou un isolant en polystyrène extrudé ou autre. La norme BNQ 2621-905 ne prescrit pas un matériau spécifique. Par exemple, le MTQ utilise des languettes

de plastique insérées dans des entailles sciée à la surface des plaques. Le cadre d'étanchéité peut être collé avec un produit d'étanchéité à base de silicone. Ce cadre d'étanchéité doit être appliquée après la cure humide du béton. Il peut également être réalisée en mortier immédiatement après la finition de la surface de l'éprouvette afin de réaliser une liaison mécanique suffisante. La hauteur du cadre d'étanchéité doit être compris entre 20 et 50 mm.

Les dimensions de l'éprouvette sont quant à elles d'une profondeur de 75 mm et une surface comprise entre 500 et 800 cm^2. Un essai comprend deux éprouvettes. La consolidation est effectuée avec un bourroir en appliquant un coup par 0,0013 m^2 de surface du moule. L'arasement est effectué avec une planche d'arasement lisse en bois de section 40 x 90 mm^2 environ. Le nombre de passe sera limité à 15 allers-retours dans chaque direction, pour un total de passes maximal de 30.

La cure humide des éprouvettes est de 14 jours en chambre humide, suivie d'une cure de 14 jours en milieu ambiant (20 ± 5°C, 50 ± 20% HR). Au milieu de la cure sèche (21 jours après la coulée de la plaque) la digue est placée. La solution saline est versée sur l'éprouvette sur une hauteur d'environ 5 ± 2 mm 28 jours après la réalisation du béton. La plaque est maintenue en milieu ambiant pendant 7 jours après l'application de la solution saline avant de démarrer les cycles de gel-dégel [27].

Par la suite, les éprouvettes sont placées dans l'appareil de gel-dégel avec un dégagement minimal de 30 mm de part et d'autre de chaque éprouvette. Celui-ci doit être tel que la surface du béton en contact avec la solution soit à une température de -18 ± 3°C lors des 7 à 10 dernières heures de la période de refroidissement et supérieure ou égale à 5°C à la fin de la période de réchauffement. La phase de refroidissement doit durer 16 ± 1 h et la phase de réchauffement 8 ± 1 h pour une durée totale de 24 h [26]. La mesure des résidus d'écaillage est effectuée après 7, 21, 35 et 56 cycles lors de l'utilisation d'un appareil automatisé. La surface de l'éprouvette est rincée avec une nouvelle solution saline, et les résidus sont récupérés sur un papier filtre, puis placés dans une étuve à 110°C et enfin pesés. Entre chaque cycle, il peut être nécessaire de rajouter de l'eau salée. De plus, après chaque mesure, la solution saline doit être remplacée par une solution fraiche.

L'interprétation visuelle des résultats se fait après chaque mesure, selon le Tableau 3.8, tiré de la norme BNQ 2621-905/2018 Annexe B [27]. Cette méthode d'analyse visuelle formera une partie de l'objet de la recherche présentée.

Tableau 3.8 - Caractéristique d'une surface écaillée - mortier de surface [27]

Cote	Portion de la surface écaillée — mortier de surface	État de la surface
0	≤1 %	Aucun écaillage du mortier de surface
1	> 1 % et ≤ 5 %	Écaillage très léger du mortier de surface
2	> 5 % et ≤ 10 %	Écaillage modéré du mortier de surface
3	> 10 % et ≤ 30 %	Écaillage important du mortier de surface
4	> 30 % et ≤ 50 %	Écaillage sévère du mortier de surface
5	> 50 %	Écaillage très sévère du mortier de surface
NOTE — Le pourcentage de surface écaillée associée au mortier de surface est à titre indicatif seulement.		

L'endommagement des gros granulats à la surface d'un béton soumis à un essai d'écaillage a été étudié par Morin-Morissette [19]. Un éclatement est considéré comme un « pop-out » s'il satisfait l'un des critères suivants :

1 Des feuillets détachés de la surface du granulat sont visibles dans la zone endommagée (Figure 3.22)

Figure 3.22 - Présence de feuillets en surface due à un « pop-out » [19]

2 Le volume interne du granulat de la zone endommagée a été fracturé ou délaminé (Figure 3.23)

Figure 3.23 - Fracture visible d'un granulat [19]

3 La présence d'un cône d'arrachement dont le fond révèle un granulat nettement délaminé en surface (Figure 3.24)

Figure 3.24 - Cône de pâte détachée et fracture visible à la surface du granulat [19]

4 Un granulat exposé et présentant des signes de ruptures doit avoir un diamètre en surface d'au moins 5 mm.

3.3.5 Exigences normatives pour les propriétés physiques des gros granulats

Le Tableau 3.9 présente les limites de substances nuisibles et des propriétés physiques des granulats pour béton selon le tableau 12 de la norme CSA A23.1 [17]. Pour les gros granulats, les limites varient en fonction des conditions d'exposition. Dans le cas d'un béton exposé au gel-dégel, les pertes maximales à l'essai micro-Deval et à l'essai de gel-dégel non confiné sont respectivement de 17 % et 6 %. Cependant, ces limites peuvent être différentes dans le cas particulier de certains granulats tels que le calcaire et les dolomies des Basses-terres du Saint-Laurent. Ainsi, pour le gel-dégel non confiné, la limite de 6 % peut être augmentée à 9 % pour les bétons exposés au gel. Pour l'essai micro-Deval, la limite maximale de 17 % peut être augmentée à 19 %.

Globalement, ces exigences de performance tirées du tableau 12 de la norme CSA A23.1 montrent que certaines caractéristiques intrinsèques des gros granulats (micro-Deval et gel-dégel non confiné) peuvent avoir un impact très significatif sur la durabilité au gel des bétons exposés au climat canadien. Au Québec, la durabilité à l'écaillage du béton est évaluée à l'aide de la procédure d'essai normalisée présentée à l'Annexe B de la norme BNQ 2621-905 [27]. Selon cette norme, le critère de performance à l'écaillage impose une masse maximale des débris de 500 g/m^2 après 56 cycles de gel-dégel. L'endommagement des granulats (« pop-out ») n'est pas spécifiquement mesuré par cette procédure d'essai. Il n'y a pas non plus de valeur limite maximale imposée pour les éclatements. L'endommagement des granulats n'est évalué que qualitativement à l'aide de grilles visuelles présentées au tableau 2 de l'Annexe B de la norme BNQ 2621-905 (Tableau 3.10).

Tableau 3.9 - Limites de substances nuisibles* et propriétés physiques des granulats [20, 24]

Méthode d'essai de la CSA	Propriété	Pourcentage maximal de la masse totale de l'échantillon		
			Gros granulat	
		Granulat fin	Béton soumis au gel-dégel	Autres conditions d'exposition
	Exigences fondamentales			
A23.2-3A	Mottes d'argile†*****	1,0	0,3	0,5
A23.2-4A	Constituants granulaires de faible densité‡*****	0,5	0,5	1
A23.2-5A	Particules fines passant le tamis de 80 µm	3,0§	1,0**	1,0**
A23.2-13A	Particules plates et allongées	—	20	20
	Procédure A, rapport 4:1, ou			
	Procédure B	—	25	25
	Particules plates	—	45	45
	Particules allongées	—	40	40
	Particules allongées (chaussées et bétons à haute performance)			
A23.2-23A A23.2-29A	Essai micro-Deval††	20	17	21
A23.2-24A	Essai de gel-dégel non confiné‡‡	—	6	10
A23.2-16A A23.2-17A	Perte à l'impact et à l'abrasion§§	—	50	50
	Exigences alternatives* **			
A23.2-9A	Perte à l'essai $MgSO_4$	16	12	18

*Les limites de substances nuisibles, non répertoriées dans ce tableau telles que le charbon, l'ocre (roche ferrugineuse), le shale, le siltstone ou le calcaire argileux doivent être spécifiées par le maître d'ouvrage de façon à englober toutes les substances nuisibles connues existant dans une région donnée. En l'absence de ces renseignements, les granulats seront acceptés ou refusés selon l'article 4.2.3.9.

†On entend par mottes d'argile les substances sédimentaires fines, consolidées d'aluminosilicates aqueux.

‡On utilise habituellement un liquide ayant une densité relative de 2,0 pour séparer les particules de charbon ou de lignite. Des liquides de densité relative supérieure ou inférieure à 2,0 pourraient être nécessaires pour l'identification d'autres substances nuisibles de densité inférieure.

§Cette limite peut être portée à 5 % si le matériau argileux (particules de moins de 2 µm) ne représente pas plus de 1 % de la totalité de l'échantillon de granulat fin. La quantité de constituants de la dimension de l'argile doit être déterminée par analyse hydrométrique, conformément à la ASTM D422, sur un échantillon lavé sur un tamis de 80 µm.

**Dans le cas du granulat concassé, si les particules passant le tamis de 80 µm sont constituées de poussière de concassage essentiellement exempte d'argile ou de shale, cette limite peut être portée à 2,0 %.

†† CSA A23.2-23A est une méthode d'essai du granulat fin rapide et extrêmement précise. De plus, elle présente une étroite corrélation avec l'essai de résistance à la désagrégation par le $MgSO_4$. Pour plus de renseignements, voir Rogers, Bailey et Price (1991).

‡‡CSA A23.2-24A est une méthode d'essai du gros granulat offrant une bonne précision et une corrélation acceptable avec l'essai de résistance à la désagrégation par le $MgSO_4$. Pour plus de renseignements, voir Rogers, Senior et Boothe (1989).

§§La perte due à l'abrasion ne doit pas dépasser 35 % lorsque le granulat est utilisé pour la construction de chaussées en béton ou d'autres surfaces exposées à une usure importante. Cette restriction ne s'applique pas au granulat de laitier de haut-fourneau refroidi à l'air. On peut déroger aux exigences de perte due à l'abrasion pour le gros granulat dans la mesure où le matériau satisfait aux autres exigences de l'essai micro-Deval indiquées à ce tableau.

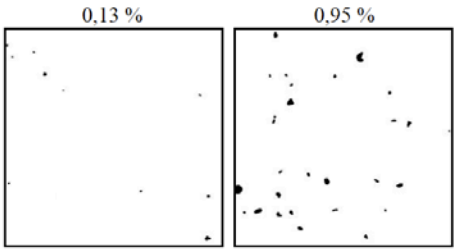
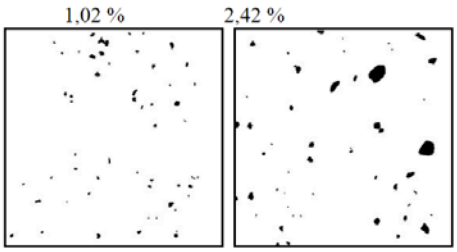
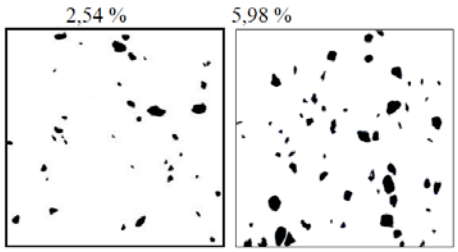
***On peut déroger aux exigences de l'essai micro-Deval applicables au granulat fin ou aux exigences de résistance au gel-dégel du gros granulat dans la mesure où le matériau satisfait aux autres exigences de perte à l'essai $MgSO_4$ indiquées à ce tableau.

*****Si le gros granulat testé selon la A23.2-15A n'indique pas la présence de mottes d'argile ou de constituants granulaires de faible densité, les exigences de l'essai selon 3A et 4A peuvent être omises.

Notes :

1) Voir l'article 4.2.3.9 pour la fissuration par dégradation (D-cracking).
2) On a constaté que pour certains granulats, tels que le calcaire et les dolomites des Basses-terres du Saint-Laurent, la limite de 9 plutôt que 6 pour le béton soumis au gel-dégel plutôt que 6 était satisfaisante pour les classes d'exposition F-1, C-XL, C-1 et C-2, ainsi que la limite de 13 plutôt que 10, dans le cas d'autres conditions d'exposition (voir l'article 4.2.3.10.3).
3) On a constaté que pour certains granulats, tels que le calcaire et les dolomites des Basses-terres du Saint-Laurent, la limite de 19 plutôt que 17 à l'essai micro-Deval était satisfaisante pour les classes d'exposition F-1, C-XL, C-1 et C-2 (voir l'article 4.2.3.10.3). Ces limites plus élevées seront seulement acceptées si les producteurs de granulats peuvent démontrer que la production annuelle présente moins de 2,0 % de matériaux nuisibles (argileux), selon la détermination de la CSA A23.2-15A.
4) En ce qui concerne les notes 2 et 3, voir le rapport d'Alain Blanchette (2004) et (2006) par le RPPG (Regroupement professionnel des producteurs de granulats du Québec), afin d'obtenir de plus amples renseignements sur les calcaires et les dolomites des Basses-terres du Saint-Laurent.
5) Le maître d'ouvrage doit spécifier la procédure A ou la procédure B pour la détermination de la forme des particules des gros granulats.
6) Si les limites d'usure à l'appareil Micro-Deval du tableau 12 pour le granulat fin sont respectées, il n'est pas nécessaire de procéder aux essais visant les mottes d'argile et les matériaux granulaires de faible densité.

Tableau 3.10 - Caractéristiques d'une surface écaillée - cône d'éclatement [27]

Cote	Charte visuelle	Portion de la surface écaillée — cônes d'éclatement	État de la surface
A		≤ 1 %	Aucun ou peu de cônes d'éclatement en surface
B		> 1 % et ≤ 2,5 %	Présence faible à modérée de cônes d'éclatement en surface
C		> 2,5 %	Présence importante et sévère de cônes d'éclatement en surface

NOTES —

1 Cône d'éclatement (*popout*) : cavité en forme de cratère résultant de l'éclatement d'un granulat à la surface du béton. La dimension de ce cratère varie en fonction de la dimension des granulats. Une partie du granulat éclaté doit être observée au fond de ce cratère.

2 La charte visuelle ainsi que la portion de surface écaillée associée aux cônes d'éclatement sont à titre indicatif seulement.

4 CHOIX ET ÉCHANTILLONNAGE DES SOURCES GRANULAIRES

4.1 CRITÈRES DE SÉLECTION

Le choix des sources granulaires et la campagne d'échantillonnage ont été réalisés conjointement par les équipes de l'Université de Sherbrooke, de l'Université Laval et du MTQ. Les sources ont été choisies en fonction des critères suivants :

- Composition minéralogique représentative des sources granulaires communément utilisées pour produire des bétons prêts à l'emploi. Cependant des sources granulaires ont été choisies même si elles ne sont pas destinées à une utilisation dans le béton prêt à l'emploi. Ce choix a été fait pour obtenir une plus grande diversité et pour mieux couvrir l'ensemble des plages de caractéristiques intrinsèques et de fabrication.
- Perte à l'essai micro-Deval dans la plage de 2% à 21%
- Perte à l'essai de gel-dégel non confiné dans la plage de 0% à 11%
- Disponibilité des sources granulaires avec une dimension maximale nominale de 14 mm ou 20 mm
- Accord du propriétaire du site de production
- État d'exploitation et accessibilité du site de production

4.2 CHOIX DES CATÉGORIES DE PERFORMANCE

Les sources ont été sélectionnées à partir de bases de données du MTQ et de l'ACRGTQ. Les choix ont été faits à partir des caractéristiques intrinsèques déjà connues : minéralogie, micro-Deval, gel-dégel non confiné. La sélection des 17 sources granulaires a notamment été accomplie sur la base des exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1, en considérant principalement la perte à l'essai de gel-dégel non confiné et la perte à l'essai micro-Deval. Des sources ont été choisies en raison de leurs faibles pertes aux essais de gel-dégel et micro-Deval. À l'inverse, des sources ont été choisies pour leurs fortes pertes à ces deux essais. De plus, plusieurs sources ont été choisies pour leurs pertes intermédiaires ou pour une perte élevée à l'un des deux essais et faible pour l'autre. La sélection des sources a aussi pris en compte la nature minéralogique (granite, dolomie, calcaire, basalte, grès) pour s'assurer de disposer d'un échantillonnage représentatif et diversifié.

Le chapitre 5 présente les caractéristiques détaillées de l'ensemble des sources choisies. Le Tableau 9.1 présente une synthèse de l'ensemble des caractéristiques intrinsèques et de fabrication des sources granulaires.

4.3 ÉCHANTILLONNAGE DES SOURCES GRANULAIRES

Les 17 sources granulaires sélectionnées ont été échantillonnées durant l'été 2018 en utilisant la procédure d'échantillonnage LC 21-010 (Figure 4.1). Pour chaque source granulaire, tout le processus d'échantillonnage a été réalisé en présence des représentants des universités et du MTQ. Toutes les entreprises visitées avaient été prévenues par l'ACRGTQ/RPPG.

Figure 4.1 - Processus d'échantillonnage des sources granulaires

4.4 STOCKAGE DES SOURCES GRANULAIRES

Pour chaque site de production, l'échantillonnage a permis de remplir deux barils métalliques propre de 250 litres et quelques dizaines de kg supplémentaires conservés dans des sacs en plastique robustes et étanches (Figure 4.2). En utilisant le camion de l'Université de Sherbrooke présent dans chaque carrière, un baril a été transporté à l'Université de Sherbrooke et l'autre livré à l'Université Laval. Les échantillons conservés dans les sacs de plastique ont été remis à l'équipe du MTQ. Immédiatement après le prélèvement les matériaux granulaires ont été conservées dans les barils munis d'où couvercle métallique étanche. Ils ont ensuite été stockés à l'intérieur ou à l'extérieur en fonction des besoins et des disponibilités d'espace.

Figure 4.2 - Barils et couvercles métalliques pour le stockage des sources granulaires

5 PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES ET CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION DES SOURCES GRANULAIRES

Les 17 sources granulaires identifiées au chapitre 4 ont fait l'objet d'une caractérisation détaillée qui inclue tous les essais prescrits dans le tableau 12 de la norme CSA. Ces essais ont été réalisés par le laboratoire du secteur granulats du MTQ. En plus de cette caractérisation par le MTQ, certaines propriétés jugées potentiellement déterminantes en regard de la durabilité au gel des particules ont été mesurées par d'autres laboratoires dans le but d'avoir la meilleure caractérisation possible de ces propriétés:

- La perte à l'essai micro-Deval : Deux laboratoires mandataires et le laboratoire de l'Université Laval
- La perte à l'essai de gel-dégel non confiné : Deux laboratoires mandataires
- La perte à l'essai $MgSO_4$: Deux laboratoires mandataires
- L'analyse pétrographique : Laboratoires du MTQ et de l'Université Laval.

Cette caractérisation a été accomplie par l'équipe de l'Université Laval, du MTQ et par deux laboratoires mandataires. L'analyse pétrographique a été accomplie par l'équipe de l'Université Laval et le MTQ; les principaux faciès identifiés par les pétrographes ayant réalisé l'examen pétrographique sont présentés dans le Tableau 11.3. Les paragraphes qui suivent présentent certaines caractéristiques de fabrication et certaines propriétés intrinsèques des 17 sources granulaires utilisées pour cette étude.

5.1 SOURCE 1

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à un calcaire de couleur gris à gris foncé. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : calcaire à grains fins, calcaire fossilifère, calcaire à plaquage argileux, shale calcareux et calcaire argileux. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 146 qui correspond à une qualité physico-mécanique « médiocre » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat n'est pas adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.1 - Aspect visuel du granulat de la source 1, fraction 14 - 20 mm.

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,68 et une absorption de 0,85 %. Le Tableau 5.1 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 1.

Tableau 5.1 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 1

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	100	98	99	98
	14	75	60	71	65
	10	38	26	38	29
	5	4	3	3	3
	2,5	2	2	2	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	20,8	17,7	17,4	18,3	**18,6**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	7,9	5,3	9		**7,4**
NP	146	145			**146**
Densité SSS			2,68		
Absorption (%)			0,85		

5.2 SOURCE 2

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche ignée métamorphisée. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : granite, du granite altéré, du granodiorite, du gabbro, de la diorite et de la syénite. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 130 qui correspond à une qualité physico-mécanique « passable ». Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat n'est pas adapté pour la production de béton de ciment de catégories C1, C2, F1, C-XL, A-XL, A-1 et A-2.

Figure 5.2 - Aspect visuel du granulat de la source 2, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,64 et une absorption de 0,98 %. Le Tableau 5.2 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 2.

Tableau 5.2 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 2

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	98	97	96	96
	14	66	66	72	67
	10	42	42	49	42
	5	13	14	16	14
	2,5	7	8	9	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	12,9	13,1	11,2	10,1	**11,8**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	3,6	2,8	4,3		**3,6**
NP	136	124			**130**
Densité SSS			**2,64**		
Absorption (%)			**0,98**		

5.3 SOURCE 3

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à différents types de calcaires. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : calcaire à grains fins gris-foncé, calcaire fossilifère à grains fins ou moyens de couleur beige, et calcaire ± argileux avec plaquage argileux. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 118 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Le granulat provenant de la source 3 a la particularité d'être une combinaison de deux calibres de granulats ([5-14] mm et [10-20] mm). La proportion de chaque calibre pour obtenir une classe [5-20] mm a été vérifiée à l'Université de Sherbrooke et a donné comme résultat : 63 % de [5-14] mm et 37 % de [10-20] mm. Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,68 et une absorption de 0,55 %. Le Tableau 5.3 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 3.

Figure 5.3 - Aspect visuel du granulat de la source 3, fraction 10 - 14 mm

Tableau 5.3 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 3

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	99	96	99	96
	14	75	67	77	69
	10	52	45	53	47
	5	6	5	6	5
	2,5	4	4	3	--
micro-Deval	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
Perte massique (%)	20,9	20,1	19,5	19,8	**20,1**
Gel-dégel non confiné	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
Perte massique (%)	2,7	1,2	2,8		**2,2**
NP	113	122			**118**
Densité SSS			**2,68**		
Absorption (%)			**0,55**		

5.4 SOURCE 4

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche volcanique mafique correspondant à un basalte. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : basalte amygdalaire, du basalte à veines de calcite, du basalte noir, du basalte rouge, des veines de calcite et du basalte vert altéré. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 104 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.4 - Aspect visuel du granulat de la source 4, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,87 et une absorption de 1,20 %. Le tableau 5.4 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 4.

Tableau 5.4 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 4

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	97	93	94	88
	14	58	50	55	52
	10	29	22	30	25
	5	5	3	5	4
	2,5	2	2	2	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	9,7	9,8	8,6	8,3	**9,1**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	5,3	4,0	8,4		**5,9**
NP	106	101			**104**
Densité SSS			**2,87**		
Absorption (%)			**1,20**		

5.5 SOURCE 5

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à une dolomie. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : dolomie à grains fins, dolomie cristalline, dolomie à grains moyens, dolomie avec des traces de sulfures de fer rouillés, dolomie à veines de calcite et de la dolomie ± argileuse avec plaquage argileux. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 109 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton.

Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.5 - Aspect visuel du granulat de la source 5, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,79 et une absorption de 0,60 %. Le Tableau 5.5 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 5.

Tableau 5.5 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 5

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	99	95	99	98
	14	65	65	70	76
	10	45	48	50	61
	5	7	8	10	12
	2,5	2	2	2	--
micro-Deval	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
Perte massique (%)	9,4	8,7	8,2	7,8	**8,5**
Gel-dégel non confiné	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
Perte massique (%)	6,9	4,6	2,9		**4,8**
NP	112	105			**109**
Densité SSS			**2,79**		
Absorption (%)			**0,60**		

5.6 SOURCE 6

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à un calcaire. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3): calcaire fossilifère, calcaire fin, calcaire avec sulfures de fer rouillées, calcaire ± argileux avec plaquage argileux et du shale. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 127 qui correspond à une qualité physico-mécanique « passable ». Selon le

NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (20219) suggère que le granulat n'est pas adapté pour la production de béton de ciment de catégories C1, C2, F1, C-XL, A-XL, A-XL, A-1 et A-2.

Figure 5.6 - Aspect visuel du granulat de la source 6, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,71 et une absorption de 0,60 %. Le Tableau 5.6 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 6.

Tableau 5.6 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 6

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	98	94	96	95
	14	96	71	77	74
	10	55	37	46	39
	5	9	6	7	6
	2,5	4	3	2	--
micro-Deval	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
Perte massique (%)	18,1	18,2	17,6	17,1	**17,8**
Gel-dégel non confiné	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
Perte massique (%)	6,5	4,3	7,7		**6,2**
NP	124	129			**127**
Densité SSS			**2,71**		
Absorption (%)			**0,60**		

5.7 SOURCE 7

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche volcanique correspondant à du phonolite et du basalte. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : phonolite ± foncé, basalte et phonolite avec sulfures oxydés. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique moyen (NP) de 104 qui

correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.7 - Aspect visuel du granulat de la source 7, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,52 et une absorption de 0,50 %. Le Tableau 5.7 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 7.

Tableau 5.7 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 7

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	96	91	95	95
	14	58	61	57	63
	10	31	33	29	34
	5	5	4	4	4
	2,5	2	1	1	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	2,6	2,8	2,2	2,1	**2,4**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	0,8	0,3	1,3		**0,8**
NP	107	100			**104**
Densité SSS			**2,52**		
Absorption (%)			**0,50**		

5.8 SOURCE 8

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à subarrondie. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à différents types de calcaires. Selon les pétrographes, l'échantillon est

composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : calcaire à grains fins, calcaire argileux, calcaire fossilifère, calcaire avec plaquage argileux, calcaire avec sulfures oxydés, calcaire à veines de calcite et quelques rares particules de basalte. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 149 qui correspond à une qualité physico-mécanique « médiocre » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat n'est pas adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.8 - Aspect visuel du granulat de la source 8, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,67. Il à noter que cette source possède l'absorption la plus élevée parmi les 17 sources choisies soit 1,41 %. Le Tableau 5.8 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication de la source 8.

Tableau 5.8 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 8

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	93	91	96	94
	14	59	56	62	60
	10	32	30	34	33
	5	4	5	3	4
	2,5	3	3	2	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	20,2	19,4	19,4	18,6	**19,4**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	10,5	4,5*	10,1		**10,3**
NP	146	152			**149**
Densité SSS			**2,67**		
Absorption (%)			**1,41**		

*Valeur non retenue pour le calcul de la moyenne

5.9 SOURCE 9

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 14 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche métamorphique correspondant à différents types de schistes, du quartzite et des veines de quartz.

Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : schiste à séricite/chlorite (différentes teintes avec parfois des particules contenant des sulfures oxydés), quartzite et des veines de quartz. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 149 qui correspond à une qualité physico-mécanique « médiocre » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat n'est pas adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.9 - Aspect visuel du granulat de la source 9, fraction 10 - 14 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,70 et une absorption de 0,70 %. Le Tableau 5.9 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 9.

Tableau 5.9 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 9

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	100	100	100	100
	14	91	83	80	93
	10	65	53	41	65
	5	13	11	4	15
	2,5	5	5	1	--
micro-Deval	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
Perte massique (%)	19,0	18,8	15,2	--	**17,7**
Gel-dégel non confiné	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
Perte massique (%)	2,5	0,9	2,6		**2,0**
NP	159	139			**149**
Densité SSS			**2,70**		
Absorption (%)			**0,70**		

5.10 SOURCE 10

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à différents types de calcaires. Selon les pétrographes, l'échantillon est

composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : calcaire fin, du calcaire cristallin, calcaire argileux avec plaquage argileux, calcaire fossilifère, calcaire altéré, veines de calcite et shale. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 124 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.10 - Aspect visuel du granulat de la source 10, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,71 et une absorption de 0,50 %. Le Tableau 5.10 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 10.

Tableau 5.10 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 10

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	99	99	100
	20	98	88	93	92
	14	71	59	68	71
	10	47	33	44	44
	5	11	7	10	11
	2,5	4	3	4	--
micro-Deval	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
Perte massique (%)	19,4	17,9	18,1	18,2	**18,4**
Gel-dégel non confiné	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
Perte massique (%)	2,5	0,7	1,8		**1,7**
NP	126	121			**124**
Densité SSS			**2,71**		
Absorption (%)			**0,50**		

5.11 SOURCE 11

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à différents types de calcaires. Selon les pétrographes, l'échantillon est

composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : calcaire à grains fins, calcaire cristallin, calcaire fossilifère, calcaire avec sulfures oxydés et calcaire argileux. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 137 qui correspond à une qualité physico-mécanique « passable » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat n'est adapté pour la production de béton de ciment de catégories C1, C2, F1, C-XL, A-XL, A-1 et A-2.

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,70 et une absorption de 0,50 %. Le Tableau 5.11 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication de la source 11.

Figure 5.11 - Aspect visuel du granulat de la source 11, fraction 14 - 20 mm

Tableau 5.11 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 11

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	99	97	97	96
	14	65	68	67	73
	10	33	34	37	41
	5	4	5	6	7
	2,5	2	3	3	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	14,8	15,2	14,8	15,6	**15,1**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	11,4	7,4	11,9		**10,2**
NP	136	137			**137**
Densité SSS			**2,70**		
Absorption (%)			**0,50**		

5.12 SOURCE 12

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à une dolomie généralement à grains fins. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : dolomie de couleur

gris-clair à gris-foncé, dolomie avec plaquage argileux, dolomie avec sulfures de fer oxydés, dolomie à veines de calcite/dolomite et dolomie argileuse. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 116 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,82 et une absorption de 0,62 %. Le Tableau 5.12 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication de la source 12.

Figure 5.12 - Aspect visuel du granulat de la source 12, fraction14 - 20 mm

Tableau 5.12 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 12

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	99	97	97	91
	14	65	68	67	52
	10	33	34	37	34
	5	4	5	6	5
	2,5	2	3	3	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	6,4	6,7	6,2	6,1	**6,4**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	3,2	2,5	3,1		**2,9**
NP	120	112			**116**
Densité SSS			**2,82**		
Absorption (%)			**0,62**		

5.13 SOURCE 13

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à différents types de calcaire et de dolomie. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : calcaire fin, calcaire

cristallin, calcaire fossilifère, veines de calcite, calcaire argileux, calcaires avec sulfures oxydés et dolomie. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 120 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.13 - Aspect visuel du granulat de la source 13, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,74 et une absorption de 0,80 %. Le Tableau 5.13 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 13.

Tableau 5.13 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 13

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	98	94	97	96
	14	73	69	76	71
	10	54	47	60	50
	5	6	6	8	6
	2,5	3	3	3	--
micro-Deval	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
Perte massique (%)	16,3	14,6	15,2	13,6	**14,9**
Gel-dégel non confiné	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
Perte massique (%)	6,6	3,1	3,9		**4,5**
NP	121	118			**120**
Densité SSS			**2,74**		
Absorption (%)			**0,80**		

5.14 SOURCE 14

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche volcanique correspondant à un basalte et à une brèche volcanique. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : brèche volcanique, basalte vert à rougeâtre, basalte rouge ou vert avec veines de calcite. Ce gros granulat possède un nombre

pétrographique (NP) moyen de 102 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,88 et une absorption de 0,90 %. Le Tableau 5.14 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication de la source 14.

Figure 5.14 - Aspect visuel du granulat de la source 14, fraction 14 - 20 mm

Tableau 5.14 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 14

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	94	84	81	89
	14	55	44	57	48
	10	34	24	37	26
	5	4	3	5	3
	2,5	2	1	1	--
micro-Deval	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
Perte massique (%)	8,5	9,2	8,7	6,8	**8,3**
Gel-dégel non confiné	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
Perte massique (%)	7,4	4,9	6,9		**6,4**
NP	100	103			**102**
Densité SSS			**2,89**		
Absorption (%)			**0,90**		

5.15 SOURCE 15

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à du grès et du mudrock. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : grès dur à grains fins et moyens, grès avec veines de calcite, mudrock gris à noir ± lité, et veines de calcite. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) de 117 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production

du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.15 - Aspect visuel du granulat de la source 15, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,72 et une absorption de 0,70%. Le Tableau 5.15 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 15.

Tableau 5.15 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 15

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	92	94	93	88
	14	57	65	67	66
	10	34	41	42	41
	5	7	14	10	8
	2,5	4	10	4	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	16,1	13,5	15,3	14,3	**14,8**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	3,5	2,9	2,3		**2,9**
NP	123	111			**117**
Densité SSS			**2,72**		
Absorption (%)			**0,70**		

5.16 SOURCE 16

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 14 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à différents types de calcaire. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : calcaire cristallin, calcaire fossilifère, calcaire à grains fins, calcaires avec plaquage argileux et shale. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) moyen de 121 qui qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la

production du béton. Selon le NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.16 - Aspect visuel du granulat de la source 16, fraction 10 - 14 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,71 et une absorption de 0,80 %. Le Tableau 5.16 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 16.

Tableau 5.16 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 16

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	100	100	100	100
	14	98	97	99	99
	10	66	73	76	82
	5	7	7	9	12
	2,5	2	2	2	--
micro-Deval	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
Perte massique (%)	19,1	19,4	19,4	21,1	**19,8**
Gel-dégel non confiné	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
Perte massique (%)	8,8	5,2	5,7		**6,6**
NP	123	118			**121**
Densité SSS			**2,71**		
Absorption (%)			**0,80**		

5.17 SOURCE 17

Ce granulat se compose de pierre concassée d'un calibre 5 à 20 mm. Les particules possèdent une forme anguleuse à sub-anguleuse. Les enduits qui recouvrent les particules consistent principalement en de la poussière de concassage, dont une grande partie a été éliminée au lavage. Le granulat consiste en une roche sédimentaire correspondant à différents types de grès. Selon les pétrographes, l'échantillon est composé d'un mélange de faciès parmi les suivants (Tableau 11.3) : grès (parfois avec sulfures de fer), grès quartzitique et grès avec des veines de calcite. Ce gros granulat possède un nombre pétrographique (NP) de 114 qui correspond à une qualité physico-mécanique « bonne » pour la production du béton. Selon le

NP obtenu, le tableau A3.1 de la norme CSA A23.2-15A (2019) suggère que le granulat est adapté pour la production de béton de ciment.

Figure 5.17 - Aspect visuel du granulat de la source 17, fraction 14 - 20 mm

Ce granulat a une densité en l'état saturée surface sèche (SSS) de 2,63 et une absorption de 0,50 %. Le Tableau 5.17 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats de la source 17.

Tableau 5.17 - Principales caractéristiques/propriétés des granulats de la source 17

	Ouverture du tamis (mm)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100	100	100
	20	98	95	97	96
	14	75	76	75	71
	10	55	56	54	48
	5	7	6	7	6
	2,5	4	3	3	--
micro-Deval Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3	Laboratoire 4	Moyenne
	5,9	5,2	4,8	4,2	**5,0**
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)	Laboratoire 1	Laboratoire 2	Laboratoire 3		Moyenne
	1,3	0,6	1,5		**1,1**
NP	123	105			**114**
Densité SSS			**2,63**		
Absorption (%)			**0,50**		

5.18 SOURCE GRANULAIRE DISPONIBLE À L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE (source 18)

La source granulaire utilisée couramment dans le laboratoire de l'Université de Sherbrooke est une pierre calcaire concassée (Figure 5.18). Elle est répartie en deux calibres : 5 - 14 mm et 10 - 20 mm, qui forment le squelette granulaire par l'assemblage de ces fractions (20,8 % de 5 - 14 mm pour 79,2 % de 10 - 20 mm). La courbe granulométrique combinée est donnée à la Figure 5.19. La densité SSS est 2,73 et l'absorption est 0,44%. Le Tableau 5.18 présente les principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication de la source granulaire disponible à l'université de Sherbrooke. Le gel-dégel non confiné et le micro-Deval de ce gros granulat ont été déterminés par le laboratoire de caractérisation #1.

Figure 5.18 - Aspect visuel du granulat de l'Université de Sherbrooke, fraction 10-20 mm

Tableau 5.18 -Principales caractéristiques intrinsèques et de fabrication de la source granulaire disponible à l'Université de Sherbrooke

	Ouverture du tamis (mm)	Fraction 5-14 mm	Fraction 10-20 mm
Granulométrie Tamisat cumulés (%)	28	100	100
	20	100	84
	14	81	24
	10	43	19
	5	4,6	11
	2,5	1,4	6,2
micro-Deval Perte massique (%)		10,3	
Gel-dégel non confiné Perte massique (%)		5,1	
Densité SSS		2,73	
Absorption (%)		0,44	

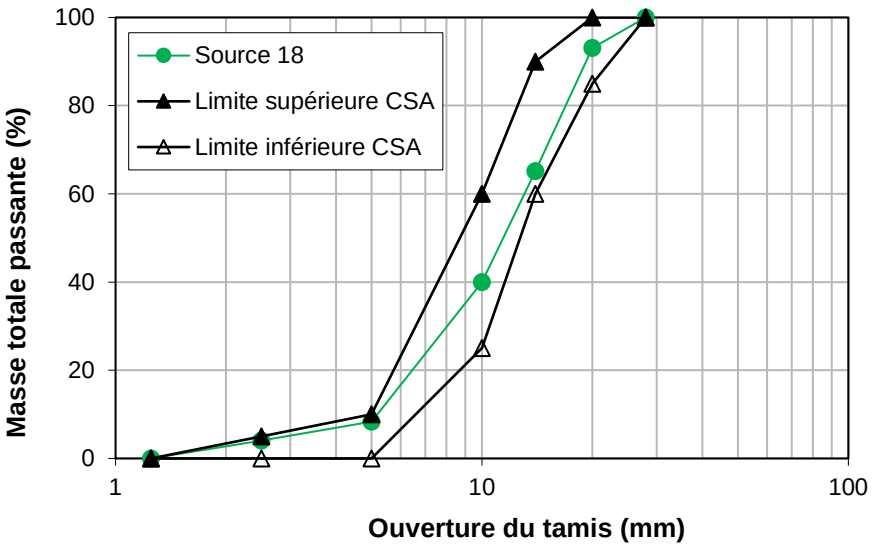


Figure 5.19 : Granulométrie de la source granulaire 18

5.19 REGROUPEMENT DES SOURCES GRANULAIRES SELON TROIS CATÉGORIES

Pour faciliter certaines composantes de l'analyse subséquente des résultats de cette étude, les sources granulaires 1 à 17 ont été divisées en trois catégories sur la base de la perte micro-Deval et de la perte au gel-dégel non confiné. Les pertes au gel-dégel et au micro-Deval sont les valeurs moyennes présentées au Tableau 9.1.

La catégorie 1 regroupe des sources granulaires ayant une perte micro-Deval égale ou inférieure à 15% **et** une perte au gel-dégel non confiné égale ou inférieure à 6%. Elle regroupe donc les sources 2, 4, 5, 7, 12, 15 et 17.

La catégorie 3 regroupe les sources granulaires ayant une perte micro-Deval supérieure à 17% **et** une perte au gel-dégel supérieure à 6%. Elle regroupe donc les sources 1, 6, 8 et 16.

La catégorie 2 regroupe les sources qui ne sont pas dans les catégories 1 et 3. La catégorie 2 comprend donc les sources qui ont une perte micro-Deval supérieure à 15% mais une perte gel-dégel inférieure à 6% et celles qui ont une perte au gel-dégel supérieure à 6% et une perte micro-Deval égale ou inférieure à 15%. Elle regroupe donc les sources 3, 9, 10, 11, 13 et 14. Le tableau 5.19 présente les sources granulaires incluses dans chacune des trois catégories.

Tableau 5.19 -Sources granulaires incluses dans les trois catégories

Catégorie	Source granulaire
1	2, 4, 5, 7, 12, 15, 17
2	3, 9, 10, 11, 13, 14
3	1, 6, 8, 16

6 CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS

Ce paragraphe présente les matériaux et les formulations détaillées de tous les bétons fabriqués dans le cadre de cette étude. Une première série comportant 19 bétons a été fabriquée à l'Université de Sherbrooke pour atteindre les objectifs des six phases de recherche de la tâche 5, décrite au paragraphe 1.3. Une deuxième série comportant 23 bétons a été fabriquée à l'Université Laval en vue de soumettre toutes les sources granulaires à un essai d'écaillage selon la procédure BNQ 2621-905. Certaines sources ont été testées avant et après le lavage des particules du gros granulat.

À l'exception des gros granulats, tous les bétons ont été produits avec les mêmes matériaux décrits dans les paragraphes qui suivent (liant, granulat fin et adjuvants). Les propriétés des gros granulats ont fait l'objet du paragraphe 5, spécifiquement prévu à cet effet.

6.1 MATÉRIAUX

6.1.1 Granulat fin

Le granulat fin utilisé pour fabriquer les bétons à l'Université de Sherbrooke et à l'Université Laval est un sable siliceux naturel contenant également des feldspaths provenant de la région de l'Estrie. La densité SSS est comprise entre 2,67 et 2,70. Le pourcentage d'absorption est compris entre 0,91 et 1,11. Deux livraisons, provenant de la même source, ont été utilisées en 2019 et en 2020. Le tableau 6.1 présente les résultats de l'analyse granulométrique, le module de finesse, la densité et l'absorption du sable.

Tableau 6.1 - Granulométrie, module de finesse, densité SSS et absorption du granulat fin utilisé à l'Université de Sherbrooke

		Tamisat cumulé (%)	
		01/19 - 09/19	09/19 - 01/20
Ouverture de tamis (mm)	10	100	100
	5	97	99
	2,5	84	85
	1,25	72	71
	0,630	56	56
	0,315	33	30
	0,160	12	7,9
	0,080	5,1	0,1
	< 0,080	4,8	0,0
Module de finesse		2,46	2,47
Densité SSS		2,70	2,67
Absorption (%)		0,91	1,11

6.1.2 Liants

Un liant ternaire de type GUb-S/SF a été utilisé pour produire les bétons des phases 1, 2, 3 et 5. Ce même liant GUb-S/SF a aussi été utilisé pour tous les bétons fabriqués à l'Université Laval. Un liant de type GU a été utilisé pour produire les bétons des phases 4 et 6. Pour des raisons de confidentialité, les fiches techniques de ces liants ne sont pas incluses dans ce document.

6.1.3 Adjuvants

Les bétons de cette étude ont été produits avec un superplastifiant (SP) de type polynaphtalène sulfonate (PNS), un réducteur d'eau à base de lignosulfonate et un AEA de type synthétique.

6.2 IDENTIFICATION DES BÉTONS

Les bétons fabriqués à l'Université de Sherbrooke sont identifiés selon une codification qui peut comporter des caractères alphabétiques et des nombres, organisés selon la séquence suivante :

AAAA-BB-CCCC

- Les premiers caractères (AAAA) sont des caractères alphabétiques ou des chiffres qui font référence au type de matrice de béton
    - BVS : Matrice de Type V-S
    - BXIII : Matrice de Type XIII
    - BF2 : Matrice de Type F2
    - BC2 : Matrice de Type C2

- Les chiffres qui suivent (BB) font référence à la dimension maximale nominale du gros granulat
    - 20 : Gros granulat de calibre 5-20 mm
    - 14 : Gros granulat de calibre 5-14 mm

- Les derniers caractères (CCCC) identifient une formulation spécifique basée sur le numéro d'identification de la source granulaire ou sur le facteur d'espacement du béton
    - 1, 2, …, 17 : Numéro de la source granulaire
    - XXX µm : Facteur d'espacement du béton

Les bétons fabriqués à l'Université Laval sont identifiés selon une codification qui débute par le numéro de la source granulaire, suivi par la lettre « A » et pouvant ensuite comporter l'étiquette « Lavé » quand la source granulaire a été lavée avant d'être utilisée pour produire les bétons. Tous les bétons fabriqués à l'Université Laval ont une matrice de Type V-S. Par exemple, la codification « 7-A-Lavé » correspond à un béton à air entraîné de type V-S produit avec la source granulaire no 7 ayant été lavée.

6.3 FORMULATION ET PROPRIETES DES BETONS FRAIS ET DURCIS

6.3.1 Bétons fabriqués à l'Université de Sherbrooke

6.3.1.1 Bétons de type VS avec le calibre de gros granulat 5-20 mm - Phase 1

Le programme de la phase 1 comporte sept bétons fabriqués avec les gros granulats de calibre 5-20 mm provenant des sources 1, 2, 3, 8, 11, 12 et 14 (Tableau 6.2). Ce sous ensemble de sept sources granulaires est justifié au paragraphe 9.1. Ces sept bétons ont un rapport E/L fixe de 0,40 et ont été produits avec un dosage en liant GUb-S/SF de 385 kg/m^3. Les dosages en superplastifiant ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 100 et 165 mm. Le dosage de l'AEA a également été ajusté pour obtenir des teneurs en air comprises entre 5,5 et 8,2 %.

Tableau 6.2 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 1

Béton		BVS-20-1	BVS-20-2	BVS-20-3	BVS-20-8	BVS-20-11	BVS-20-12	BVS-20-14
Dosage des constituants								
Liant	*[kg/m^3]*	373	390	366	368	388	380	380
Eau	*[kg/m^3]*	146	153	144	144	152	149	149
Sable	*[kg/m^3]*	739	772	726	729	769	754	752
Granulats 14 mm	*[kg/m^3]*	0	0	513	0	0	0	0
Granulats 20 mm	*[kg/m^3]*	906	932	329	889	949	965	977
Superplastifiant	*[ml/100 kg de liant]*	1052	1043	1107	1043	1045	1047	1043
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	213	213	279	213	213	225	213
Caractéristiques des bétons frais								
Rapport E/L		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	*[%]*	6,1	8	5,6	5,5	8,2	7,2	7,7
Affaissement	*[mm]*	100	160	110	100	165	125	150
Masse volumique	*[kg/m^3]*	2305	2193	2348	2334	2224	2304	2323
Résistance à la compression								
7 jours	*[MPa]*	31,8	27,2	37,1	33,4	28,2	30,5	29,4
28 jours	*[MPa]*	43,1	36,0	46,5	44,6	37,5	40,3	39,0

La Figure 6.1 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons de la phase 1. Les courbes indiquent que pour toutes les sources de granulat, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à la valeur minimale de 35 MPa pour les bétons de type V-S. Les résistances à la compression sont comprises entre 36,1 MPa pour le béton fabriqué avec le granulat de la source 2 et 46,5 MPa pour le béton fabriqué avec le granulat de la source 3.

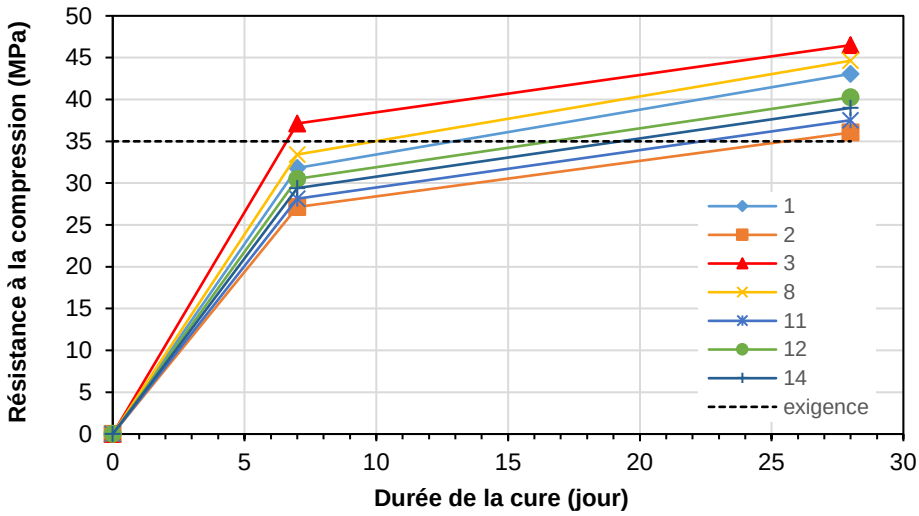


Figure 6.1 - Résistance à la compression des bétons de la phase 1

Les courbes de la Figure 6.2 montrent qu'il existe une relation entre le volume d'air à l'état frais et la résistance à la compression à 7 et 28 jours. Comme attendu, plus le volume d'air est élevé, plus la résistance à la compression est faible. Ces résultats confirment que les variations dans la résistance à la compression découlent essentiellement des variations du volume d'air.

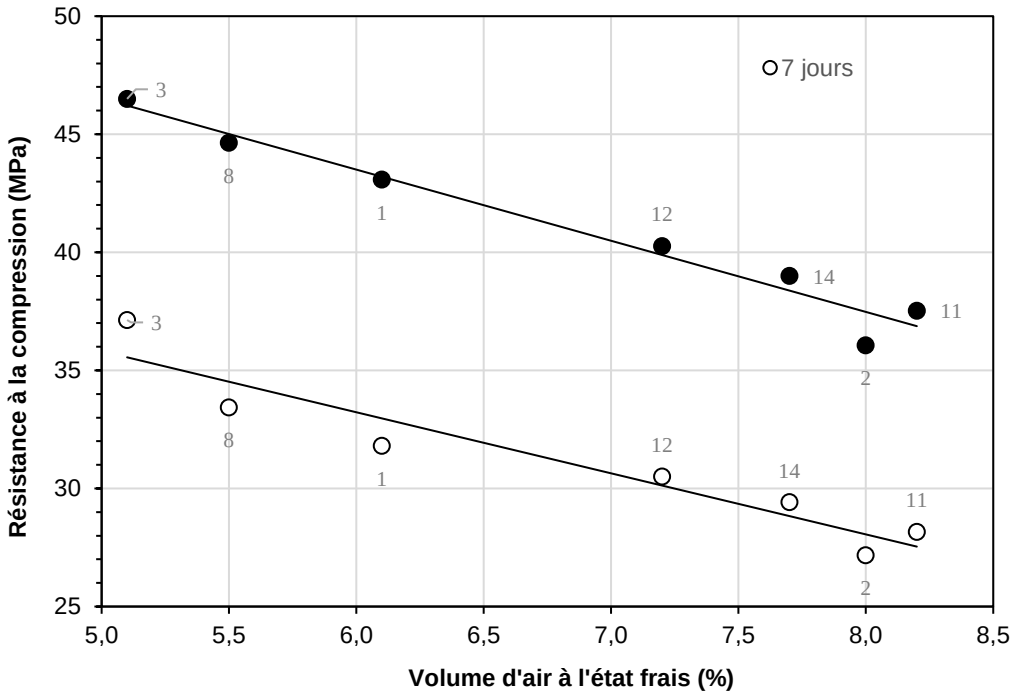


Figure 6.2 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 1

6.3.1.2 Bétons de type VS avec le calibre de gros granulat 5-14 mm - Phase 2

Le programme de la phase 2 comporte quatre bétons fabriqués avec les granulats de calibre 5-14 provenant des sources 1, 3, 8 et 11 (Tableau 6.3). Ces quatre bétons ont un rapport E/L fixe de 0,40 et ont été produits avec un dosage en liant ternaire GUb-S/SF de 385 kg/m^3. Les dosages en superplastifiant ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 100 et 195 mm. Le dosage de l'AEA a également été ajusté pour obtenir des teneurs en air comprises entre 5,1 et 9 %.

Tableau 6.3 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 2

Béton		BVS-14-1	BVS-14-3	BVS-14-8	BVS-14-11
Dosage des constituants					
Liant	*[kg/m^3]*	378	390	369	393
Eau	*[kg/m^3]*	152	159	148	158
Sable	*[kg/m^3]*	744	771	727	775
Granulats	*[kg/m^3]*	915	946	890	960
Superplastifiant	*[ml/100 kg de liant]*	1395	1044	1113	1049
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	254	212	302	302
Caractéristiques des bétons frais					
Rapport E/L		0,4	0,4	0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	*[%]*	6,8	5,1	5,4	9
Affaissement	*[mm]*	195	110	100	155
Masse volumique	*[kg/m^3]*	2276	2204	2328	2193
Résistance à la compression					
7 jours	*[MPa]*	36,3	39,1	35,8	27,0
28 jours	*[MPa]*	46,3	51,3	46,0	35,8

La Figure 6.3 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 2 en fonction du temps. Les courbes indiquent que pour toutes les sources de granulat, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à l'exigence minimale de 35 MPa exigé. Cependant, il faut noter un écart entre les résistances obtenues : le béton incorporant le granulat de la source 3 possède la résistance la plus élevée (51,3 MPa) tandis que le béton associé à la source 11 montre la plus faible résistance (35,8 MPa). Ces variations peuvent être expliquées par la variation de la teneur en air à l'état frais, comme l'indique la Figure 6.4. Ces variations sont similaires à celles mesurées lors de la phase 1.

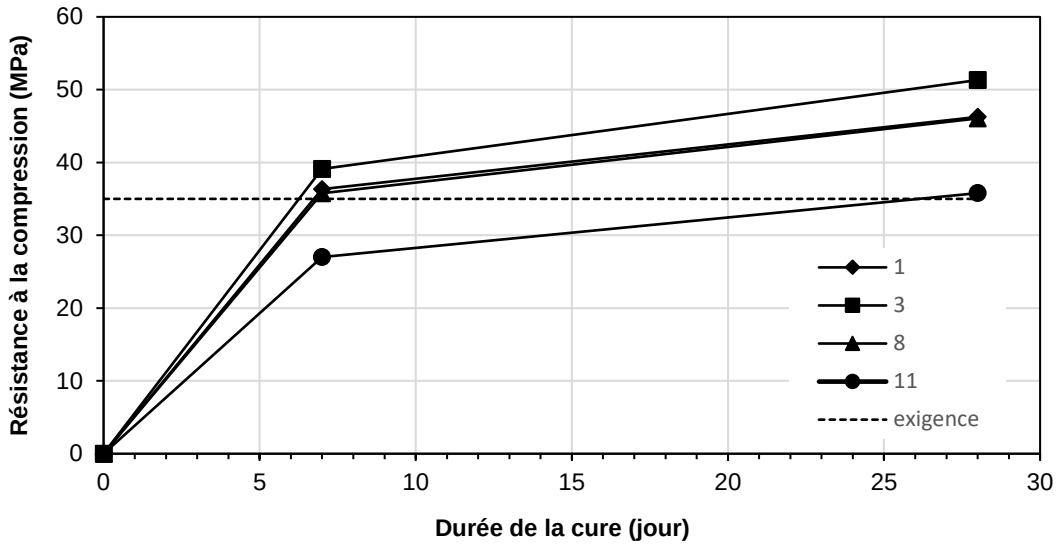


Figure 6.3 - Résistance à la compression des bétons de la phase 2

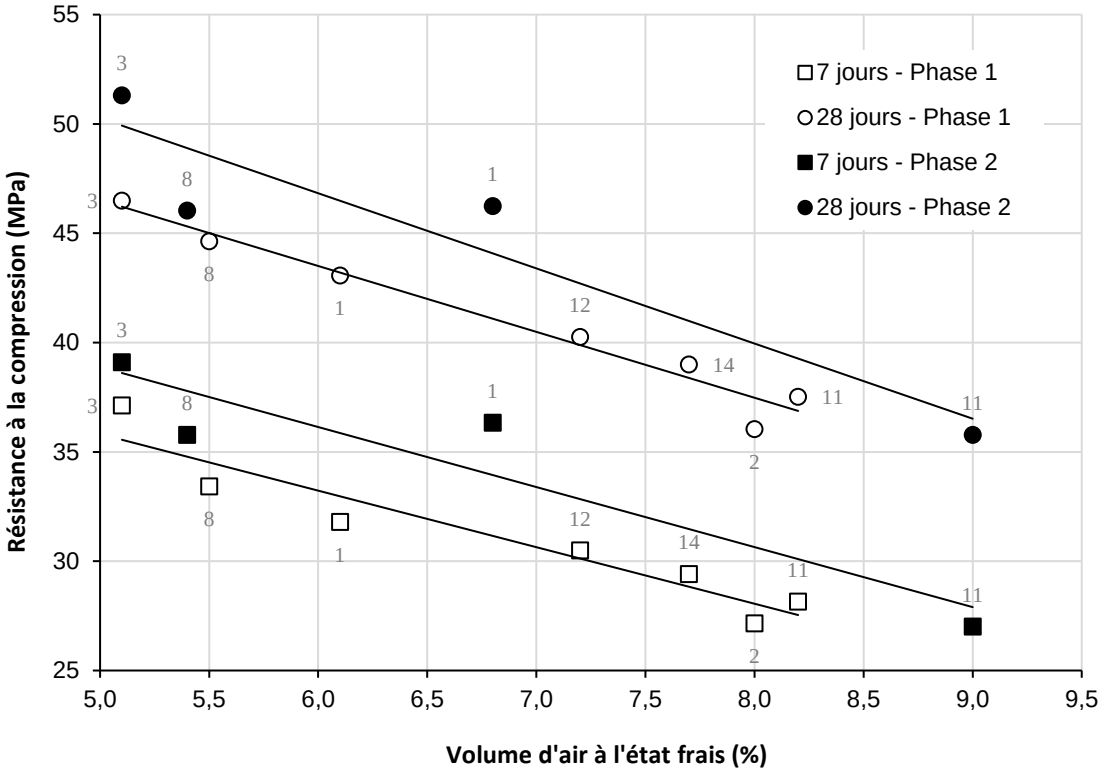


Figure 6.4 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 2

6.3.1.3 Bétons de type XIII avec le calibre de gros granulat 5-14 mm - Phase 3

Le programme de la phase 3 comporte deux bétons fabriqués avec le calibre de gros granulats 5-14 mm provenant des sources 1 et 8 (Tableau 6.4). Ces deux bétons ont un rapport E/L fixe de 0,36 et ont été

produits avec un dosage en liant ternaire GUb-S/SF de 430 kg/m^3. Les dosages en superplastifiant ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 175 et 177 mm. Le dosage de l'AEA a également été ajusté pour obtenir des teneurs en air comprises entre 5,0 et 6,2 %.

Tableau 6.4 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 3

Béton		BXIII-14-1	BXIII-14-8
Dosage des constituants			
Liant	*[kg/m^3]*	422	413
Eau	*[kg/m^3]*	154	134
Sable	*[kg/m^3]*	768	769
Granulats	*[kg/m^3]*	889	868
Superplastifiant	*[ml/100 kg de liant]*	1416	1740
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	314	366
Caractéristiques des bétons frais			
Rapport E/L		0,36	0,36
Volume d'air (état frais)	*[%]*	6,2	5,0
Affaissement	*[mm]*	175	177
Masse volumique	*[kg/m^3]*	2320	2364
Résistance à la compression			
7 jours	*[MPa]*	37,5	45,6
28 jours	*[MPa]*	50,4	59,3

La Figure 6.5 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 3 en fonction du temps. Les courbes indiquent que pour les deux sources de granulat, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à l'exigence minimale de 50 MPa. Cependant, il faut noter un écart entre les résistances mesurées : le béton incorporant le granulat de la source 8 a donné la résistance la plus élevée (59,3 MPa) tandis que le béton correspondant à la source 1 montre une résistance environ 18 % plus faible (50,4 MPa).

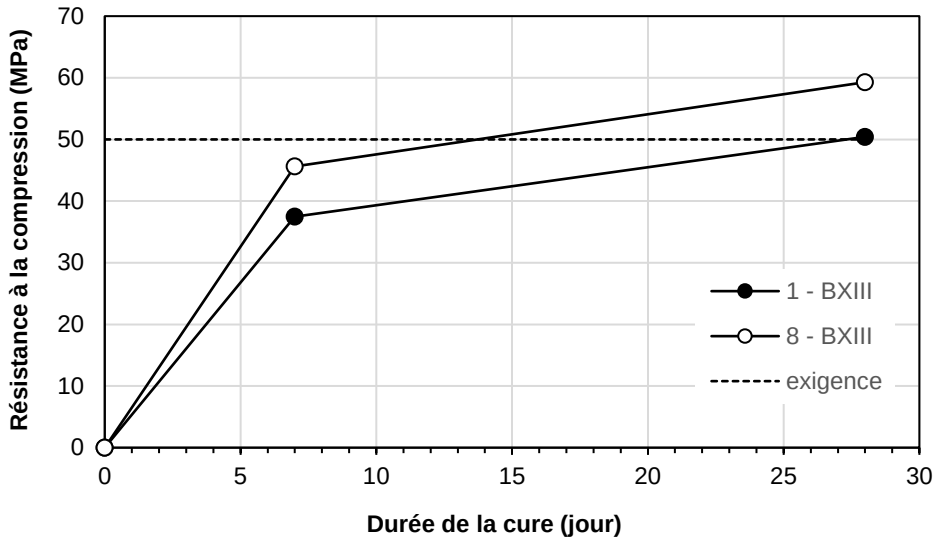


Figure 6.5 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 3

6.3.1.4 Bétons de type F2 avec le calibre de gros granulat 5-20 mm - Phase 4

Le programme de la phase 4 comporte deux bétons fabriqués avec le calibre de gros granulats 5-20 provenant des sources 1 et 8 (Tableau 6.5). Ces deux bétons ont un rapport E/L fixe de 0,55 et ont été produits avec un dosage en liant GU de 300 kg/m^3. Les dosages en réducteur d'eau ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 53 et 145 mm. Le dosage de l'agent entraîneur d'air a également été ajusté pour obtenir des teneurs en air comprises entre 5,3 et 6,4 %. Le Tableau 6.5 montre que les deux bétons produits lors de la phase 4 correspondent à des bétons de type F2. Il est à noter que le béton de type F2 n'est pas utilisé dans le cas d'une exposition aux cycles de gel-dégel et aux chlorures.

Tableau 6.5 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 4

Béton		BF2-20-1	BF2-20-8
Dosage des constituants			
Liant	*[kg/m^3]*	298	294
Eau	*[kg/m^3]*	170	159
Sable	*[kg/m^3]*	844	843
Granulats	*[kg/m^3]*	937	900
Réducteur d'eau	*[ml/100 kg de liant]*	176	174
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	51	51
Caractéristiques des bétons frais			
Rapport E/L		0,55	0,55
Volume d'air (état frais)	*[%]*	5,3	6,4
Affaissement	*[mm]*	53	145
Masse volumique	*[kg/m^3]*	2286	2281
Résistance à la compression			
7 jours	*[MPa]*	21,6	19,9
28 jours	*[MPa]*	27,5	24,9

La Figure 6.6 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 4 en fonction du temps. Les courbes indiquent que pour le béton fabriqué avec le granulat provenant de la source 1, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à l'exigence minimale de 25 MPa exigé (27,5 MPa). Cependant, le béton fabriqué avec le granulat provenant de la source 8 possède une résistance à la compression à 28 jours de 24,9 MPa, ce qui est légèrement inférieur à l'exigence minimale de 25 MPa.

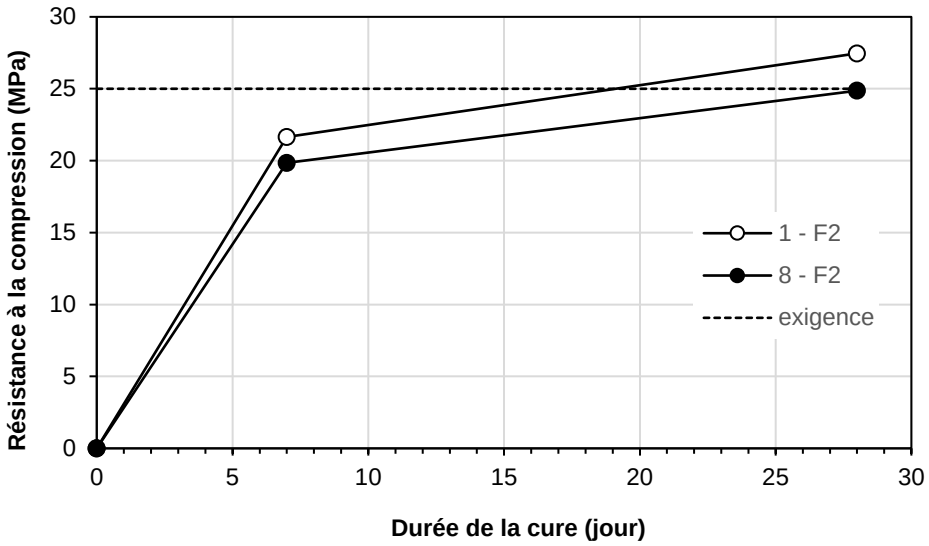


Figure 6.6 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 4

6.3.1.5 Bétons de type VS avec le calibre de gros granulat 5-20 mm pour l'étude de l'influence du facteur d'espacement - Phase 5

Le programme de la phase 5 comporte deux bétons de type VS fabriqués avec le calibre de gros granulat 5-20 mm provenant de la source 11 (Tableau 6.6). Ces bétons ont un rapport E/L fixe de 0,40 et ont été produits avec un dosage en liant ternaire GUb-S/SF de 385 kg/m^3. Les dosages en superplastifiant ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 120 et 135 mm. Le dosage de l'agent entraîneur d'air a été ajusté pour finalement obtenir des teneurs en air comprises entre 3,5 et 4,8 %. Les bétons produits pour la phase 5 montrent un facteur d'espacement compris entre 173 et 224 µm. La surface spécifique des bulles d'air de ces bétons est comprise entre 26,9 et 27,9 mm^{-1}. Les réseaux de bulles d'air sont de bonnes qualités : les facteurs d'espacement sont inférieurs à 230 µm et la surface spécifique des bulles est supérieure à 25 mm^{-1}.

Tableau 6.6 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 5

Béton		BVS-20-224 µm	BVS-20-173 µm
Dosage des constituants			
Liant	*[kg/m³]*	362	369
Eau	*[kg/m³]*	146	149
Sable	*[kg/m³]*	713	728
Granulats	*[kg/m³]*	885	903
Superplastifiant	*[ml/100kg de liant]*	1038	1041
Agent entraîneur d'air	*[ml/100kg de liant]*	79	140
Caractéristiques des bétons frais			
Rapport E/L		0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	*[%]*	3,5	4,8
Affaissement	*[mm]*	120	135
Masse volumique	*[kg/m³]*	2386	2338
Caractéristiques des bétons durcis			
$\bar{L}$	*[µm]*	224	173
α	*[1/mm]*	26,9	27,9
Volume d'air (état durci)	*[%]*	3,3	5,0
Résistance à la compression			
7 jours	*[MPa]*	37,6	35,4
28 jours	*[MPa]*	38,3	36,5

La Figure 6.7 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 5 en fonction du temps. Les courbes indiquent que pour cette série de bétons, la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à l'exigence minimale de 35 MPa.

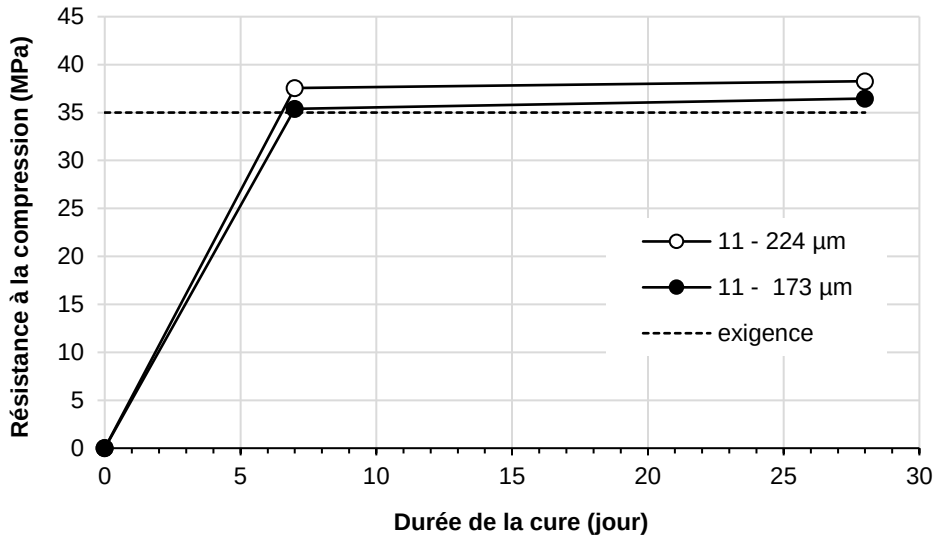


Figure 6.7 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 5

6.3.1.6 Bétons de type C2 avec le calibre de gros granulat 5-20 mm pour l'étude de l'influence du géotextile - Phase 6

Le programme de la phase 6 comporte deux bétons de type C2 fabriqués avec le calibre de granulat 5-20 mm provenant de la source de l'Université de Sherbrooke (Tableau 6.7). Ces deux bétons ont un rapport E/L fixe de 0,42 et ont été produits avec un dosage en liant GU de 400 kg/m^3. Les dosages en superplastifiant ont été ajustés pour obtenir des affaissements compris entre 54 et 90 mm. Le dosage de l'agent entraîneur d'air a été ajusté pour obtenir des teneurs en air comprises entre 3,9 et 6,6 %. Les bétons produits pour la phase 6 montrent des facteurs espacements compris entre 156 et 191 µm. La surface spécifique des bulles d'air de ces bétons est, elle, comprise entre 29,8 et 32,2 mm-1. Les réseaux de bulles d'air sont de bonne qualité : les facteurs d'espacement sont inférieurs à 230 µm et la surface spécifique des bulles est supérieure à 25 mm^{-1}.

Tableau 6.7 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis de la phase 6

Béton		BC2-20-156 µm	BC2-20-191 µm
Dosage des constituants			
Liant	*[kg/m^3]*	404	399
Eau	*[kg/m^3]*	167	158
Sable	*[kg/m^3]*	779	755
Granulats 14 mm	*[kg/m^3]*	208	201
Granulats 20 mm	*[kg/m^3]*	792	765
Réducteur d'eau	*[ml/100 kg de liant]*	553	130
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	243	50
Caractéristiques des bétons frais			
Rapport E/L		0,42	0,42
Volume d'air (état frais)	*[%]*	6,6	3,9
Affaissement	*[mm]*	90	54
Masse volumique	*[kg/m^3]*	2307	2389
Caractéristiques des bétons durcis			
$\bar{L}$	*[µm]*	156	191
α	*[1/mm]*	29,8	32,2
Volume d'air (état durci)	*[%]*	6,0	3,1
Résistance à la compression			
7 jours	*[MPa]*	29,0	33,8
28 jours	*[MPa]*	36,7	40,9

La Figure 6.8 présente l'évolution de la résistance à la compression des bétons de la phase 6 en fonction du temps. Les courbes indiquent que la résistance à la compression à 28 jours des deux bétons de cette phase est supérieure à l'exigence minimale de 32 MPa.

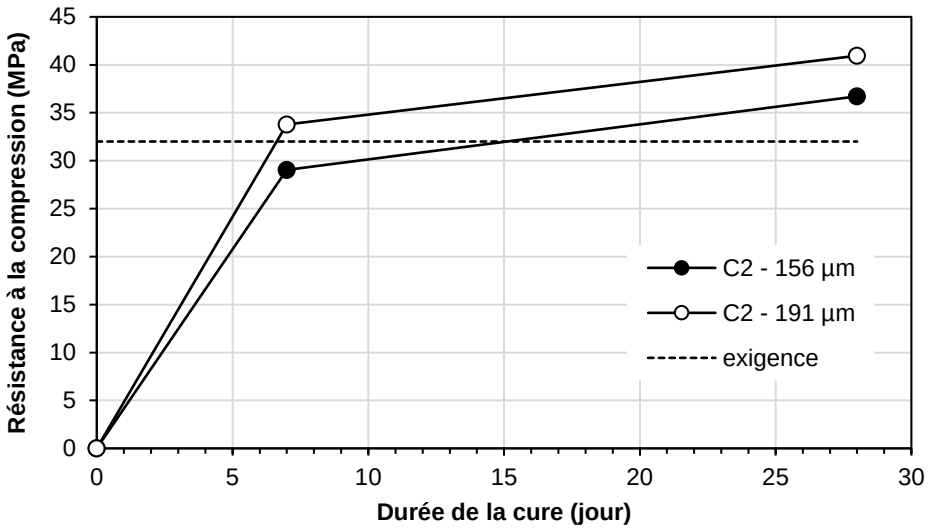


Figure 6.8 - Influence du volume d'air sur la résistance à la compression des bétons de la phase 6

6.3.2 Bétons fabriqués à l'Université Laval

Pour la campagne d'essais au CRIB Laval, une seule formulation de béton (V-S) a été sélectionnée pour évaluer le comportement à l'écaillage des 17 sources granulaires. Un béton à base d'un liant ternaire GUb-S/SF a été utilisé pour la réalisation des essais de résistance à l'écaillage. Cette formulation de béton est similaire à la formulation V-S utilisée par le CRIB Sherbrooke à la phase 1. Les tableaux 6.8 à 6.10 présentent le dosage des différents mélanges V-S et les caractéristiques des bétons.

Tableau 6.8 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis - Catégorie 1-Propriétés intrinsèques supérieures (CRIB Laval)

Béton		2-A	4-A	5-A	7-A	12-A	15-A	17-A
Dosage des constituants								
Liant	*[kg/m³]*	385	385	385	385	385	385	385
Eau	*[kg/m³]*	150	150	150	150	150	150	150
Sable	*[kg/m³]*	764	764	764	764	764	764	764
Granulats	*[kg/m³]*	924	1001	973	879	984	949	917
Superplastifiant	*[ml/100 kg de liant]*	1156	1286	1156	1104	1156	1416	1145
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	251	277	225	225	225	225	225
Caractéristiques des bétons frais								
Rapport E/L		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	*[%]*	7,1	7,9	6,6	6,6	8,0	6,2	7,0
Affaissement	*[mm]*	105	90	140	80	155	150	90
Masse volumique	*[kg/m³]*	2248	2311	2321	2226	2295	2308	2235
Résistance à la compression								
28 jours	*[MPa]*	39,8	38,0	45,9	42,1	37,4	43,3	41,8

Tableau 6.9 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis - Catégorie 2-Propriétés intrinsèques intermédiaires (CRIB Laval)

Béton		3-A	9-A	10-A	11-A	13-A	14-A
Dosage des constituants							
Liant	*[kg/m³]*	385	385	385	385	385	385
Eau	*[kg/m³]*	150	150	150	150	150	150
Sable	*[kg/m³]*	764	764	764	764	764	764
Granulats	*[kg/m³]*	935	942	945	942	956	1005
Superplastifiant	*[ml/100 kg de liant]*	1156	1416	1156	1156	1130	1156
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	225	225	225	225	225	225
Caractéristiques des bétons frais							
Rapport E/L		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	*[%]*	6,0	4,6	6,8	7,4	7,6	8,1
Affaissement	*[mm]*	100	95	145	135	110	160
Masse volumique	*[kg/m³]*	2307	2344	2282	2266	2273	2304
Résistance à la compression							
28 jours	*[MPa]*	43,0	44,4	39,1	37,5	37,9	35,4

Tableau 6.10 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis - Catégorie 3-Propriétés intrinsèques inférieures (CRIB Laval)

Béton		1-A	6-A	8-A	16-A
Dosage des constituants					
Liant	*[kg/m³]*	385	385	385	385
Eau	*[kg/m³]*	150	150	150	150
Sable	*[kg/m³]*	764	764	764	764
Granulats	*[kg/m³]*	938	945	945	945
Superplastifiant	*[ml/100 kg de liant]*	1078	1104	1130	1156
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	251	235	225	225
Caractéristiques des bétons frais					
Rapport E/L		0,4	0,4	0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	*[%]*	8,1	8,2	6,8	7,8
Affaissement	*[mm]*	115	125	95	100
Masse volumique	*[kg/m³]*	2229	2239	2276	2265
Résistance à la compression					
28 jours	*[MPa]*	34,9	35,8	39,7	39,2

La teneur en air visée pour l'ensemble des mélanges était de 5 à 8 % air. L'ajustement en AEA a permis de rencontrer cette exigence pour la plupart des mélanges. Les variations de teneur en air se situent entre 4,6% et 8,2 % d'air. Au niveau de la maniabilité, l'affaissement recherché devait se situer entre 100 et 160 mm. Les valeurs d'affaissement mesurées sont entre 80 et 160 mm.

Une seconde série de mélanges a été réalisée pour évaluer l'impact du nettoyage du granulat sur la résistance à l'écaillage. Les granulats sélectionnés pour cette seconde série sont les sources 1A, 2A, 4A, 7A, 8A et 9A. Les résultats des formulations sont présentés au tableau 6.11.

Tableau 6.11 - Formulations et propriétés des bétons frais et durcis - Granulats Lavés (CRIB Laval)

Béton		1-A-Lavé	2-A-Lavé	4-A-Lavé	7-A-Lavé	8-A-Lavé	9-A-Lavé
Dosage des constituants							
Liant	*[kg/m³]*	385	385	385	385	385	385
Eau	*[kg/m³]*	150	150	150	150	150	150
Sable	*[kg/m³]*	764	764	764	764	764	764
Granulats	*[kg/m³]*	938	924	1001	879	926	942
Superplastifiant	*[ml/100 kg de liant]*	1156	831	831	831	996	831
Agent entraîneur d'air	*[ml/100 kg de liant]*	225	156	156	114	155	156
Caractéristiques des bétons frais							
Rapport E/L		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Volume d'air (état frais)	*[%]*	10,4	6,4	6,2	5,0	6,0	5,9
Affaissement	*[mm]*	200	90	140	140	90	75
Masse volumique	*[kg/m³]*	2159	2268	2367	2269	2313	2304
Résistance à la compression							
28 jours	*[MPa]*	30,7	38,5	*46,4**	45,7	*40,1**	35,4

*Essais réalisés à 220 jours

À noter que la source 1A-Lavé est la première source lavée réalisée en laboratoire. Pour cette source lavée, une augmentation significative de l'affaissement et de la teneur en air a été observé. La disponibilité de cette source étant limité, nous n'avons pas pu reprendre cette source, par contre l'adjuvantation a été revu légèrement à la baisse pour les autres sources lavées.

7 PROCÉDURES D'ESSAIS

7.1 FABRICATION ET ÉCHANTILLONNAGE DES BÉTONS

7.1.1 Bétons fabriqués à l'Université de Sherbrooke

7.1.1.1 Procédure de gâchage

Les bétons des phases 1 à 6 ont été produits dans un malaxeur à cuve rotative de capacité maximale de 110 L (Figure 7.1). Le béton de l'échange interlaboratoires a été réalisé dans un malaxeur planétaire de capacité maximale de 150 L.

Figure 7.1 - Malaxeurs utilisés, à gauche pour les phases 1 à 6, à droite pour l'échange interlaboratoires

La même procédure de malaxage a été utilisée pour tous les bétons du projet :

1. Rinçage du malaxeur et introduction du sable ; malaxage de 30 s puis mesure de la teneur en eau. Correction des masses de sable et d'eau si nécessaire.
2. Introduction de la pierre, malaxage de 30 s.
3. Introduction de 50 % de l'eau en masse et de l'agent entraîneur d'air dilué dans l'eau de gâchage, malaxage de 90 s.
4. Introduction du liant, malaxage de 30 s.
5. Ajout de l'eau restante et du superplastifiant dilué dans l'eau de gâchage, malaxage de 3 min et 30 s.
6. Arrêt du malaxeur pendant 1 min.
7. Reprise du malaxage pendant 3 min.
8. Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams (CSA A23.2-5C). Si celui-ci correspond à l'intervalle désiré alors prise de mesure de l'air (CSA A23.2-4C). Dans le cas contraire, correction par ajout de superplastifiant, reprise du malaxage (3 min) puis reprendre l'étape 8.

7.1.1.2 Échantillonnage

Pour chaque béton, l'échantillonnage comporte sept cylindres de 100 x 200 mm. Ces cylindres ont été remplis en trois couches égales où chacune de ces couches a été pilonné 20 fois conformément à la norme CSA A23.2-3C.

En plus, trois séries de deux plaques d'écaillage de 250 x 270 mm ont été échantillonnées pour les bétons de la phase 1 (sauf le béton produit avec la source 2 qui comporte une série de deux plaques de 250 x 270 mm et deux séries de deux plaques de 230 x 305 mm dus au manque de moules de dimension identique) et une série de deux plaques d'écaillage de 250 x 270 mm pour les phases 2 à 6. Ces éprouvettes ont été prélevées selon la norme BNQ 2621-905 Annexe B. Cependant, il est important de noter que dans le cas des bétons des phases 1 à 5, les moules des plaques d'écaillage ne comportent pas de géotextile. Pour les quatre plaques de la phase 6, un géotextile en polypropylène non tissé d'une épaisseur de 7 ± 1 mm et d'une masse surfacique de 900 ± 50 g/m^2 a été déposé au fond du moule. Ce géotextile était sec et n'a jamais été utilisé auparavant. Il a été conservé lors de la cure humide et de la cure sèche puis retiré avant le début de la pré-saturation. Les plaques ont été coulées en une seule couche et consolidées avec un bourroir de 16 ± 1 mm de diamètre selon un nombre de coups correspondant à 1 par 13 cm^2 de surface de béton, pour un total de 51 coups dans le cas des plaques d'une dimension de 250 X 270 mm et de 53 dans le cas des plaques de 230 X 305 mm. À la fin du pilonnage, la surface a été régalée pour enlever le surplus de béton avec une barre d'arasement en bois de 20 x 40 x 600 mm. La face de 20 x 600 mm (le coté de 20 mm de largeur) a été utilisée afin de réaliser le régalage. La finition était limitée à 15 va-et-vient de la barre dans chacune des directions. Le début de L'arasement a été effectué par le milieu du moule afin de dégager le surplus de béton vers l'extérieur. M. Nicolas Le Piquet a réalisé toutes les finitions des différentes phases du projet réalisé à l'Université de Sherbrooke (Figure 7.2).

Figure 7.2 - Échantillonnage et finition des plaques d'écaillage (Sherbrooke)

7.1.2 Bétons fabriqués à l'Université Laval

7.1.2.1 Procédure de gâchage

La procédure de gâchage utilisée à l'Université Laval est très similaire à celle utilisée à l'Université de Sherbrooke. La procédure est décrite au Tableau 7.1. Au préalable, avant chaque gâchée de béton, le sable et la pierre sont étendus au sol (sur une bâche) pour une période de 24 à 48 heures afin de déterminer la teneur en eau (3 échantillons de 1 à 2 kg sont prélevés) (Figure 7.3). A noter que tous les bétons ont été produits dans un malaxeur planétaire de capacité maximale de 80 L (Tableau 7.1) et la même procédure de malaxage a été utilisée pour tous les bétons du projet.

Tableau 7.1 - Procédure de gâchage (CRIB Laval)

1		Badigeonner la cuve du malaxeur d'une pâte de ciment similaire au béton à fabriquer (dans notre cas, E/L = 0,4)	4		Introduction du liant V-S, puis malaxer 30s
2		Introduction de la pierre et du sable, puis malaxer 30 sec	5		Compléter avec l'ajout du dernier 50% d'eau avec le superplastifiant, puis malaxer 3m30s
3		Introduction de 50% de l'eau et de l'AEA dilué, puis malaxer 1m30s	6		Terminer le malaxage avec une pause de 1 min suivi d'une reprise de malaxage durant 3 min. Temps complet de la période de gâchage : 10 min

Figure 7.3 - Préparation des matériaux (pierre et sable) pour la fabrication des bétons

Au terme de la période de gâchage, les essais usuels d'affaissement (CSA A23.2-5C) et de teneur en air (CSA A23.2-4C) ont été réalisés. Si des corrections en superplastifiant ou AEA sont nécessaires, une reprise du malaxage de 3 min est effectuée pour assurer une bonne homogénéité.

7.1.2.2 Échantillonnage

Lors de la fabrication des bétons, trois plaques d'écaillage ont été confectionnées conformément à la norme BNQ 2621-905 Annexe B. La dimension de chaque plaque est de 23 x 30 cm (Figure 7.4). Un géotextile a été inséré au préalable dans le fond de chaque moule avant le remplissage du béton (un géotextile en polypropylène de 7 ± 1 mm et d'une masse surfacique de 900 ± 50 g/m^2). Le nombre de coups de bourroir par dalle a été de 53 coups uniformément répartis sur la surface afin de correspondre à la norme BNQ qui est de 1 coup par 13 cm^2 de surface. Au terme de la période de pilonnage, une pièce en bois humide a permis de réaliser l'arasement de la surface de béton. La barre d'arasement en bois a été marquée de façon à garder une amplitude maximale de 50 ± 10 mm lors des mouvements de finition (mouvement aller-retour perpendiculaire à la direction du déplacement de la barre d'arasement en bois). Le nombre de ces mouvements a été réparti de façon à ne pas dépasser un maximum de 30. La finition de l'ensemble des plaques du projet a été faite par le même opérateur.

Également, trois cylindres ont été confectionnés conformément à la norme CSA A23.2-3C à afin de déterminer la résistance à 28 jours en compression.

Figure 7.4 - Finition des plaques d'écaillage (Université Laval)

7.2 MURISSEMENT DES ÉPROUVETTES

7.2.1 Éprouvettes fabriquées à l'Université de Sherbrooke

La méthode de mûrissement décrite à l'Annexe B de la norme BNQ 2621-905 a été appliquée lors de toutes les phases du projet. Les échantillons ont été démoulés 24 ± 4h après la coulée. Les échantillons ont été placés par la suite dans une chambre humide pour une durée de 13 jours. Ensuite, ils ont été mis à sécher à l'air ambiant durant 14 jours. Enfin, une présaturation a été appliquée sur la surface des plaques d'écaillage pour une durée de sept jours, à l'aide d'une solution de 3 % de NaCl.

Les cylindres utilisés pour les essais de résistance à la compression ont subi une cure de mûrissement suivant la norme CSA A23.2-3C jusqu'à la réalisation des essais. Les cylindres prélevés pour les essais de réseau d'air sont restés un minimum de 14 jours en chambre humide afin de garantir une bonne hydratation du béton et ainsi favoriser une bonne qualité du polissage de surface.

7.2.2 Éprouvettes fabriquées à l'Université Laval

Immédiatement après la finition des plaques d'écaillage, un cadre muni d'un plastique étanche a été placé sur les plaques pour éviter la circulation d'air et l'évaporation précoce (Figure 7.5). Le démoulage des échantillons (plaques et cylindres), s'est déroulé 24 ± 4h après la coulée. Noter que le géotextile n'a pas été retiré des plaques d'écaillage au moment du démoulage.

Suite au démoulage, les plaques d'écaillage ont été placées dans une chambre humide (100% HR) pour une durée de 13 jours. À l'âge de 14 jours, les plaques sont entreposées dans une chambre conditionnée à 23 °C et 50 %HR pour permettre un séchage durant 14 jours. Lors du transfert des plaques entre le conditionnement humide et le séchage, un cadre d'étanchéité est installé sur la surface des plaques afin de recevoir la solution saline nécessaire à l'essai. Enfin, au terme du conditionnement à l'air, une présaturation d'une solution de 3% NaCl est appliquée à la surface des échantillons pour une période de 7

jours. L'épaisseur de la solution saline maintenue en surface est de 5 ± 2 mm. Les essais d'écaillage sont prêts à débuter à l'âge de 35 jours.

Les cylindres utilisés pour les essais de résistance à la compression ont subi une cure de mûrissement suivant la norme CSA A23.2-3C jusqu'à la réalisation des essais CSA A23.2-9C.

Figure 7.5 - Conditionnement des échantillons avant le démoulage (24 ± 4h après la coulée)

7.3 ÉSSAIS D'ÉCAILLAGE

Tous les essais d'écaillage ont été faits conformément à la procédure normalisée décrite à l'Annexe B de la norme BNQ 2621-905 (Fabrication et finition des plaques, démoulage, cure, séchage, présaturation et cycles de gel-dégel. Il faut noter que le géotextile n'a pas été retiré au moment du démoulage et que la température à l'interface béton – eau saline n'est pas enregistrée). L'enceinte de gel-dégel de l'Université Laval a été utilisée pour tester toutes les éprouvettes d'écaillage produites à l'Université Laval et l'enceinte de l'Université de Sherbrooke à été utilisée pour tester toutes les éprouvettes de l'Université de Sherbrooke.

7.3.1 Procédure à l'Université de Sherbrooke

L'enceinte de gel-dégel de l'Université de Sherbrooke est décrite en détail au paragraphe 11.2 (Figure 11.3 et Tableau 11.1). L'enceinte est asservie à l'aide de la température à l'interface du béton et de la solution saline pour 2 plaques d'écaillage témoin. Pour un cycle de 24 heures, la consigne de température imposée comporte quatre phases :

- Refroidissement linéaire aux températures de +16 à -17 °C pendant une durée de 9 heures;
- Maintien à une température de -17 °C pendant 7 heures;
- Chauffage linéaire aux températures de -17 à +16 °C pendant une durée de 6 heures;
- Maintien à une température de +16 °C pendant 2 heures.

La température moyenne des 2 plaques témoin, enregistrée pendant 24 heures, respecte la norme NQ 2621-905 avec une période de refroidissement de 16 heures qui est bien comprise entre 15 et 17 heures, une période de chauffage de 8 heures comprise entre 7 et 9 heures, une température minimale comprise entre -15 et -21 °C et une durée à la température minimale de 7 heures comprises entre 7 et 10 heures.

Dans l'enceinte de gel-dégel, les éprouvettes reposent sur une étagère en acier galvanisé qui permet la libre circulation de l'air entre les éprouvettes de béton (Figure 7.6). L'étagère a été positionnée dans la moitié gauche de l'enceinte de gel-dégel. La dimension des éprouvettes est 25,4 x 27,9 x 76,2 cm (Figure 7.7).

Figure 7.6 - Étagère en acier galvanisé pour le stockage des plaques d'écaillage dans l'enceinte de gel-dégel

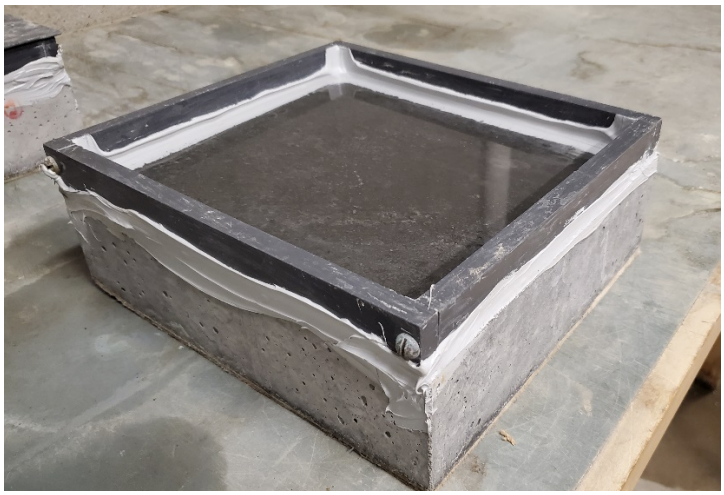


Figure 7.7 - Éprouvette de béton pour l'essai d'écaillage

Pour chaque échéance de mesure, les débris sont récupérés en inclinant légèrement la plaque d'écaillage et en rinçant la surface à l'aide d'une solution saline (Figure 7.8). Les débris sont rincés à l'eau potable sur

un tamis 80 µm. Ils sont ensuite séchés à l'étuve (110 °C) pendant au moins 24h puis pesés sur une balance précise à 0,1 g. La masse de débris est exprimée en kg/m^2 en tenant compte de la surface exposée à la solution saline (surface à l'intérieur du cadre d'étanchéité).

Figure 7.8 - Dispositif pour la récupération des débris à la surface de l'éprouvettes de béton

7.3.2 Procédure à l'Université Laval

Dans le cadre du projet de recherche, l'ensemble des plaques d'écaillage ont été positionnés au centre de la chambre d'écaillage de l'Université Laval (Figure 7.9). Un cycle de de gel-dégel typique est décrit au Tableau 7.2 :

Tableau 7.2 - Cycle de gel-dégel typique chambre écaillage (CRIB Laval)

Etape	Description	Durée
1	Gel à -18 °C en mode « ramp »	2h
2	Maintien du gel (-18 °C)	12h
3	Dégel à 25 °C en mode « ramp »	2h
4	Maintien à 25 °C	8h

Figure 7.9 - Emplacement des échantillons durant les essais de résistance à l'écaillage BNQ 2621-905 Annexe B (CRIB Laval)

Un essai complet d'écaillage doit prendre 56 cycles (ou 56 jours à raison d'un cycle par jour). La masse de débris qui se détache de la surface a été mesurée à 7, 21, 35 et 56 cycles. La récupération des débris s'effectue en inclinant légèrement la dalle vers l'avant et en rinçant, à l'aide d'une solution saline neuve, la surface pour en déloger les débris d'écaillage (Figure 7.10). Les débris sont par la suite nettoyés à l'eau potable et filtrés au tamis 80 µm. Par la suite, ceux-ci sont séchés à l'étuve (110 °C) pour un minimum de 24h et pesés sur une balance d'une capacité de 610 g précise au 1 mg (Figure 7.11). La masse de débris est par la suite exprimée en kg/m^2 en tenant compte de la surface exposée à la solution saline (surface à l'intérieur du cadre d'étanchéité). Il est à noter que la solution saline à la surface des dalles est renouvelée à chaque échéance de mesure.

En plus des mesures de perte de masse, un suivi de l'endommagement de la surface (éclatements et dégarnissements) a été réalisé par le biais d'un acétate placée sur le dessus des plaques. La technique est décrite plus en détail à la section 7.4. La mesure des éclatements et dégarnissements a été réalisée par le même opérateur pour l'ensemble du projet de recherche. Également, une photo a été prise à chaque échéance afin de pouvoir déterminer une cote visuelle de l'état d'endommagement tel que décrit dans la norme BNQ 2621-905 Annexe B.

Figure 7.10 - Dispositif permettant la récupération des débris pour la perte de masse à l'écaillage BNQ 2621-905 Annexe B (CRIB Laval)

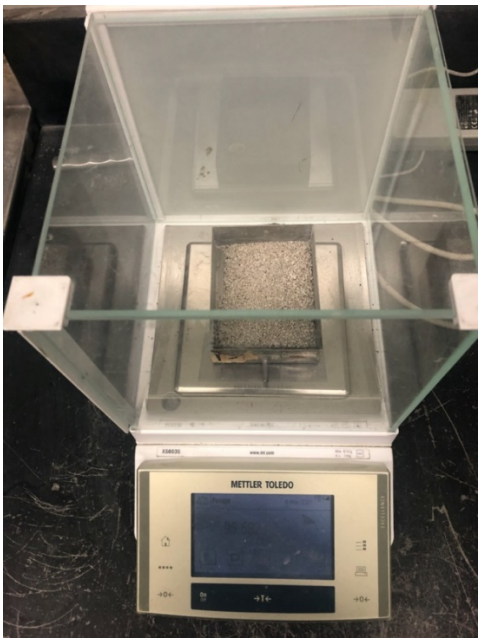


Figure 7.11 - Pesée des débris pour la perte de masse à l'écaillage BNQ 2621-905 Annexe B (CRIB Laval)

7.4 MESURES ET ANALYSE DES ÉCLATEMENTS ET DÉGARNISSEMENTS

Deux types d'endommagement des particules du gros granulat peuvent survenir lors de l'essai de résistance à l'écaillage du béton : le dégarnissement de la pâte et l'éclatement des particules localisées

près de la surface. Cette section a pour but de proposer des critères visuels pour identifier ces deux types de dommages et aussi de décrire une procédure expérimentale pour quantifier ces deux types de dégradations.

7.4.1 Critères d'identification des éclatements et dégarnissements

7.4.1.1 Dégarnissement

Un dégarnissement d'une particule du gros granulat est défini par la présence d'un cône d'arrachement ou un décollement de la pâte au-dessus (décollement de la pâte) ou à proximité (cône d'arrachement) d'une particule de granulat, mais n'est pas associé à son éclatement. Les Figures 7.12 et 7.13 montrent deux exemples de dégarnissement (cercles rouges). Le cercle noir de la Figure 7.13 montre l'éclatement consécutif au dégarnissement de la particule du gros granulat.

Figure 7.12 - Exemple du dégarnissement d'une particule du gros granulat sans éclatement

Figure 7.13 - Exemple de dégarnissement (cercle rouge) étant apparu avant l'éclatement (cercle noir) d'une particule du gros granulat

7.4.1.2 Éclatement (« *pop-out* »)

Un éclatement est un endommagement dans la masse de la particule du gros granulat selon un ou plusieurs des mécanismes décrits à la Figure 3.10. La Figure 7.14 montre quatre exemples visuels d'éclatements observés durant un essai d'écaillage en laboratoire. L'éclatement indicé A correspond au cas le plus courant. Il s'agit de la délamination par couche progressive du granulat. Cette délamination peut mener au cas B : la disparition totale de la particule de granulat. L'exemple C correspond à une particule de granulat fracturée en profondeur. Enfin, l'exemple D présente un cône d'arrachement de la pâte de ciment hydraté autour d'une particule délaminée.

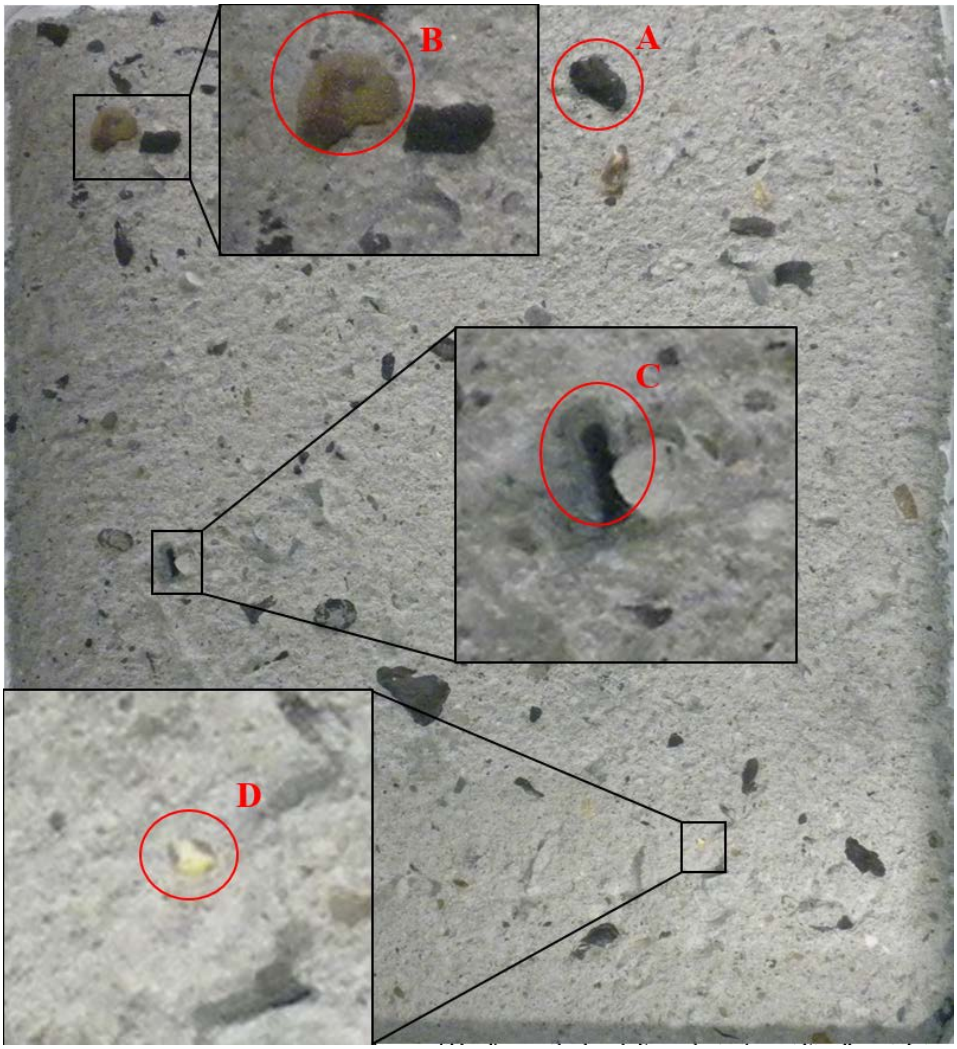


Figure 7.14 -Exemples de différents éclatements susceptibles d'apparaître lors de l'essai de résistance à l'écaillage réalisé en laboratoire

7.4.2 Procédure d'analyse optique

Maintenant que les dégarnissements et les éclatements sont définis, il faut pouvoir les relever et les analyser. La méthode choisie est une méthode optique d'analyse d'images en utilisant un acétate pour relever les éclatements et dégarnissements (Figure 7.15). Les Figures 7.16 à 7.18 présentent un même béton pour faciliter la compréhension de la méthode. Des couleurs ont été définies pour identifier les éclatements (en noir) et les dégarnissements (en rouge) afin de faciliter la suite de l'analyse. L'identification de l'acétate est située en bas à droite (couleur verte).

Figure 7.15 - Exemple de relevé de « pop-out » et de dégarnissements sur un acétate

Un seul acétate est utilisé pour caractériser l'évolution d'une plaque pendant les 56 cycles. Cela permet d'observer rapidement l'évolution des éclatements et dégarnissements. Ainsi, ce même acétate est modifié à 7, 21, 35 et 56 cycles de gel-dégel. À chaque échéance, l'acétate est déposé sur la surface de béton, préalablement lavée et débarrassée des débris d'écaillage, mais encore à l'état humide. Les éclatements et les dégarnissements sont identifiés visuellement au travers de l'acétate transparent. La surface des dégarnissements est coloriée en rouge à l'aide d'un crayon feutre permanent à pointe fine. La surface des éclatements est coloriée en noir avec un crayon feutre du même type. Lors de l'échéance suivante, de nouveau dégarnissements ou de nouveaux éclatements peuvent apparaître. Des dégarnissements et des éclatements existants peuvent aussi s'agrandir. De plus, il arrive parfois qu'un dégarnissement se transforme en éclatement. La couleur rouge est alors remplacée par la couleur noire.

Après chaque relevé, les acétates sont numérisés (Figure 7.16). Pour éviter les erreurs, il est nécessaire de bien nettoyer l'acétate et la vitre du scanneur avant la numérisation. Il faut utiliser une feuille blanche posée sur l'acétate pour produire un fond blanc parfaitement uniforme.

Figure 7.16 - Exemple du scan d'un acétate suite au relevé des éclatements et dégarnissements

L'acétate numérisé est analysé par deux macros à l'aide du logiciel ImageJ [29] (Annexe 1). La première, nommée « surf_eclat », filtre les dégarnissements (en rouge) pour ne laisser apparaître que les éclatements (Figure 7.17). L'identification de l'acétate (en vert) est également filtrée pour qu'il ne reste que les éclatements (en noir). Ce filtre procède en trois étapes :

- La première est d'attribuer une valeur à chaque pixel de l'image (le minimum équivaut au noir, le maximum au blanc, et toutes les valeurs intermédiaires correspondent aux différentes couleurs, selon le même principe que celui utilisé pour les pixels d'un écran Rouge Vert Bleu).
- La deuxième est de supprimer tous les pixels dont la valeur est supérieure à celle du noir et leur attribuer la valeur du blanc.
- Enfin, les zones noires dont la dimension moyenne est inférieure à 5 mm sont également supprimées. Pour cela, le nombre de pixel de chaque zone est comparé au nombre de pixel correspondant à un cercle de diamètre 5 mm, et est filtrée si cette valeur est inférieure.

Les surfaces résiduelles sont dénombrées puis additionnées pour exprimer la surface totale des éclatements en pourcentage de la surface totale de la plaque de béton (ce qui correspond à la surface totale de l'acétate). La Figure 7.17 présente un exemple typique de la sortie de la macro « surf_eclat ».

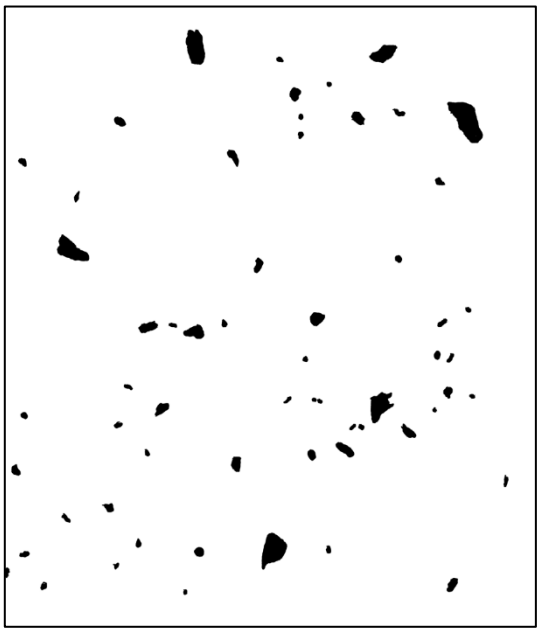


Figure 7.17 - Exemple de sortie de la macro « surf_eclat »

La prochaine étape consiste à utiliser la même numérisation initiale (Figure 7.18) mais en la traitant avec la seconde macro « surf_totale ». Celle-ci ne filtre que le texte d'identification de l'acétate (en vert) et procède de la même manière que celle décrite précédemment en ne retirant que les pixels de couleur verte. De plus, les zones de dégarnissements ou éclatements inférieures à 5 mm sont également filtrées. La Figure 7.18 montre un exemple typique de la sortie de la macro « surf_totale ».

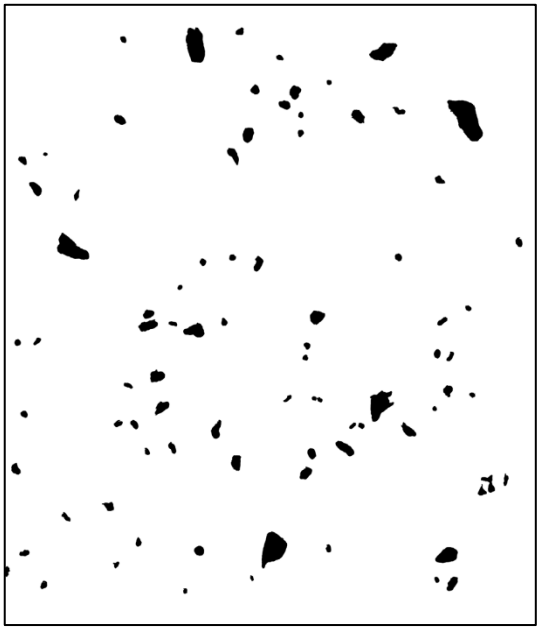


Figure 7.18 - Exemple de sortie de la macro « surf_totale »

La dernière étape consiste à déterminer les dégarnissements en soustrayant numériquement les surfaces éclatées de la surface totale obtenue avec la macro « surf_totale ». Les éclatements sont exprimés en pourcentage de la surface totale de la plaque de béton (largeur x hauteur en pixels de l'acétate).

8 RÉSULTATS DES ESSAIS D'ÉCAILLAGE RÉALISÉS AVEC TOUTES LES SOURCES GRANULAIRES

8.1 GRANULATS NON-LAVÉS

La figure 8.1 présente la masse des débris cumulée pour chacune des sources en fonction du nombre de cycles. La limite maximale de la masse des débris est 0,5 kg/m^2. Sur les 17 granulats étudiés, sept sources (6A, 11A, 12A, 14A, 15A, 16A et 17A) sont en dessous de la limite maximale de 0,5 kg/m^2 à 56 cycles. Six sources granulaires (1A, 3A, 5A, 8A, 10A et 13A) sont légèrement au-dessus de la limite du BNQ mais restent en dessous de la limite du MTO de 0,8 kg/m^2 à 56 cycles (voir norme *CSA A23.2-22C*). Finalement, les quatre sources qui montrent une résistance plus faible à l'écaillage (2A, 4A, 7A et 9A) se situent entre 0,90 et 1,35 kg/m^2. A noter que sur la figure 8.1, les granulats de catégorie 1 sont identifiés par des marqueurs en forme de cercle, ceux de catégorie 2 par des triangles et finalement les granulats de catégorie 3 sont représentés par des carrés.

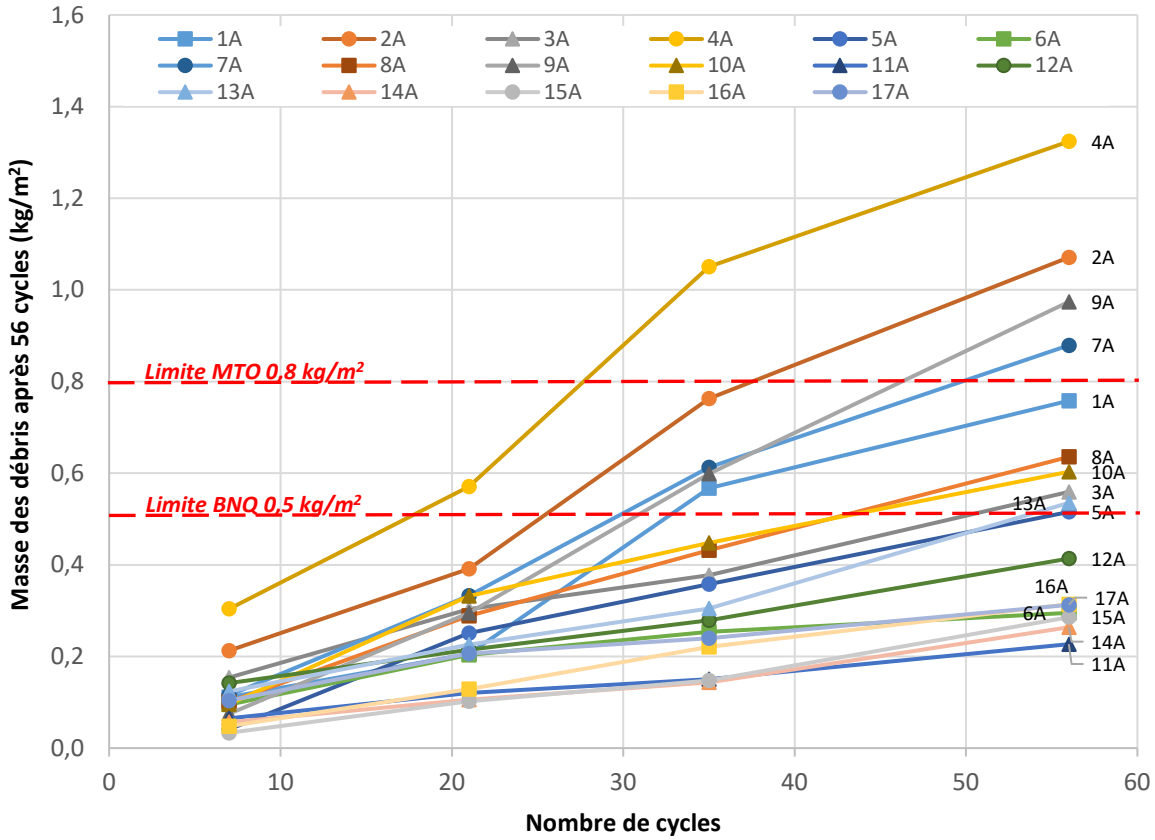


Figure 8.1 - Masse des débris cumulée (kg/m^2) des 17 sources en fonction du nombre de cycles

Les tableaux 8.1 à 8.3 présentent les masses de débris cumulatives à l'écaillage pour chacune des plaques et les résultats d'analyse d'image (surfaces de granulats dégarnies et éclatées) selon la méthode décrite à la section 7.4. L'ensemble des fiches d'essais individuelles avec photo est disponible à l'Annexe 2

Tableau 8.1 - Masse des débris cumulative et résultats d'analyse d'image (dégarnissements et éclatements) pour les granulats de catégorie 1 (propriétés intrinsèques supérieures)

		Source granulat [-]	Dalle	Résistance à l'écaillage															
				Perte de masse (cumulative) [kg/m³]				Analyse d'image											
								Surface dégamie [%]				Surface éclatée ("*popout*") [%]				Surface totale [%]			
				7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles
Catégorie 1	Propriétés intrinsèques supérieures	#2-A	2-A-1	0,16	0,33	0,71	1,09	10,99	12,70	13,38	13,96	0,39	0,52	0,87	1,54	11,38	13,22	14,25	15,50
			2-A-2	0,19	0,34	0,62	0,87	11,40	12,74	13,30	13,28	0,59	0,66	0,90	1,33	11,99	13,40	14,20	14,60
			2-A-3	0,29	0,51	0,96	1,25	11,00	12,84	13,92	14,63	0,54	0,54	0,80	1,11	11,53	13,39	14,72	15,74
			Moyenne	**0,21**	**0,39**	**0,76**	**1,07**	**11,13**	**12,76**	**13,53**	**13,96**	**0,51**	**0,57**	**0,86**	**1,33**	**11,63**	**13,34**	**14,39**	**15,28**
			CV	**0,31**	**0,25**	**0,23**	**0,18**	**0,02**	**0,01**	**0,02**	**0,05**	**0,21**	**0,13**	**0,06**	**0,16**	**0,03**	**0,01**	**0,02**	**0,04**
		#4-A	4-A-1	0,30	0,56	1,11	1,39	3,68	4,79	5,61	5,43	0,83	0,95	1,49	1,77	4,51	5,74	7,11	7,19
			4-A-2	0,23	0,49	1,01	1,21	1,41	2,57	3,38	3,74	0,24	0,33	0,68	1,57	1,65	2,89	4,06	5,30
			4-A-3	0,38	0,67	1,04	1,36	2,21	3,39	3,47	3,80	0,22	0,37	0,66	0,78	2,43	3,76	4,13	4,59
			Moyenne	**0,30**	**0,57**	**1,05**	**1,32**	**2,44**	**3,58**	**4,15**	**4,32**	**0,43**	**0,55**	**0,95**	**1,37**	**2,86**	**4,13**	**5,10**	**5,69**
			CV	**0,24**	**0,16**	**0,05**	**0,07**	**0,47**	**0,31**	**0,30**	**0,22**	**0,81**	**0,64**	**0,50**	**0,38**	**0,52**	**0,35**	**0,34**	**0,24**
		#5-A	5-A-1	0,03	0,26	0,36	0,51	0,20	0,99	1,27	1,02	0,42	1,09	1,16	2,00	0,62	2,08	2,43	3,02
			5-A-2	0,04	0,24	0,32	0,49	0,30	0,65	0,89	1,00	0,20	0,39	0,58	0,76	0,50	1,04	1,47	1,76
			5-A-3	0,06	0,25	0,39	0,55	0,37	1,12	1,33	1,43	0,22	0,39	0,50	0,86	0,59	1,51	1,83	2,29
			Moyenne	**0,04**	**0,25**	**0,36**	**0,52**	**0,29**	**0,92**	**1,16**	**1,15**	**0,28**	**0,62**	**0,75**	**1,21**	**0,57**	**1,54**	**1,91**	**2,36**
			CV	**0,44**	**0,04**	**0,10**	**0,07**	**0,29**	**0,26**	**0,21**	**0,21**	**0,43**	**0,65**	**0,48**	**0,57**	**0,11**	**0,34**	**0,25**	**0,27**
		#7-A	7-A-1	0,08	0,24	0,44	0,67	-	2,56	3,72	4,35	-	0,76	1,15	1,47	-	3,32	4,87	5,82
			7-A-2	0,10	0,32	0,58	0,91	3,42	7,01	7,98	9,76	0,36	0,60	0,69	1,09	3,78	7,61	8,68	10,84
			7-A-3	0,17	0,44	0,82	1,05	2,12	5,37	7,42	7,53	0,42	0,96	1,25	1,49	2,53	6,33	8,67	9,02
			Moyenne	**0,12**	**0,33**	**0,61**	**0,88**	**2,77**	**4,98**	**6,37**	**7,21**	**0,39**	**0,77**	**1,03**	**1,35**	**3,16**	**5,75**	**7,41**	**8,56**
			CV	**0,41**	**0,30**	**0,31**	**0,22**	**0,62**	**0,45**	**0,36**	**0,38**	**0,58**	**0,24**	**0,29**	**0,17**	**0,61**	**0,38**	**0,30**	**0,30**
		#12-A	12-A-1	0,15	0,21	0,29	0,39	0,34	1,06	1,06	1,37	0,75	1,04	1,74	1,82	1,10	2,10	2,80	3,19
			12-A-2	0,10	0,17	0,20	0,28	0,78	0,70	1,09	1,02	0,64	1,06	1,51	1,80	1,42	1,77	2,61	2,81
			12-A-3	0,17	0,27	0,35	0,58	1,05	1,04	1,08	1,42	0,33	0,70	1,34	1,70	1,37	1,74	2,41	3,12
			Moyenne	**0,14**	**0,21**	**0,28**	**0,41**	**0,72**	**0,94**	**1,08**	**1,27**	**0,57**	**0,93**	**1,53**	**1,77**	**1,29**	**1,87**	**2,61**	**3,04**
			CV	**0,25**	**0,23**	**0,28**	**0,37**	**0,49**	**0,21**	**0,02**	**0,17**	**0,39**	**0,22**	**0,13**	**0,04**	**0,13**	**0,11**	**0,07**	**0,07**
		#15-A	15-A-1	0,03	0,08	0,12	0,23	2,24	2,88	3,16	4,07	0,35	0,49	1,60	1,85	2,59	3,38	4,76	5,92
			15-A-2	0,03	0,08	0,10	0,18	1,42	2,44	3,11	4,94	0,88	1,52	2,26	2,44	2,29	3,96	5,37	7,37
			15-A-3	0,05	0,15	0,22	0,44	1,64	2,83	3,27	4,72	0,90	1,75	3,03	3,07	2,54	4,59	6,30	7,78
			Moyenne	**0,03**	**0,10**	**0,15**	**0,29**	**1,76**	**2,72**	**3,18**	**4,57**	**0,71**	**1,26**	**2,30**	**2,45**	**2,47**	**3,97**	**5,48**	**7,03**
			CV	**0,40**	**0,43**	**0,43**	**0,49**	**0,24**	**0,09**	**0,03**	**0,10**	**0,43**	**0,53**	**0,31**	**0,25**	**0,06**	**0,15**	**0,14**	**0,14**
		#17-A	17-A-1	0,21	0,38	0,42	0,53	4,26	6,49	6,70	8,37	0,56	0,84	1,02	0,94	4,81	7,32	7,72	9,31
			17-A-2	0,03	0,09	0,11	0,14	2,56	4,98	5,58	6,07	0,36	1,09	1,12	1,08	2,93	6,07	6,70	7,15
			17-A-3	0,07	0,15	0,18	0,27	2,80	4,85	6,22	6,92	0,69	1,11	1,28	1,38	3,49	5,96	7,51	8,30
			Moyenne	**0,10**	**0,21**	**0,24**	**0,31**	**3,21**	**5,44**	**6,17**	**7,12**	**0,54**	**1,01**	**1,14**	**1,13**	**3,74**	**6,45**	**7,31**	**8,25**
			CV	**0,91**	**0,72**	**0,67**	**0,64**	**0,29**	**0,17**	**0,09**	**0,16**	**0,31**	**0,15**	**0,12**	**0,20**	**0,26**	**0,12**	**0,07**	**0,13**

Tableau 8.2 - Masse des débris cumulative et résultats d'analyse d'image (dégarnissements et éclatements) pour les granulats de catégorie 2 (propriétés intrinsèques intermédiaires)

				Résistance à l'écaillage															
		Source granulat	Dalle	Perte de masse (cumulative) [kg/m³]				Analyse d'image											
								Surface dégarnie [%]				Surface éclatée ("popout") [%]				Surface totale [%]			
		[-]		7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles
Catégorie 2	Propriétés intrinsèques intermédiaires	#3-A	3-A-1	0,09	0,37	0,71	1,22	0,58	0,81	0,85	0,93	0,36	0,62	0,99	1,27	0,94	1,43	1,84	2,20
			3-A-2	0,06	0,22	0,46	0,74	0,39	0,50	0,81	0,79	0,24	0,60	0,64	0,97	0,63	1,10	1,45	1,76
			3-A-3	0,07	0,30	0,63	0,98	0,40	0,81	0,97	0,87	0,33	0,51	0,72	1,45	0,73	1,32	1,69	2,32
			Moyenne	**0,08**	**0,30**	**0,60**	**0,98**	**0,46**	**0,71**	**0,88**	**0,86**	**0,31**	**0,58**	**0,78**	**1,23**	**0,77**	**1,28**	**1,66**	**2,09**
			CV	**0,55**	**0,54**	**0,53**	**0,54**	**0,23**	**0,25**	**0,09**	**0,08**	**0,20**	**0,10**	**0,23**	**0,20**	**0,21**	**0,13**	**0,12**	**0,14**
		#9-A	9-A-1	0,09	0,37	0,71	1,22	5,34	8,43	11,36	16,64	1,32	2,02	2,40	3,19	6,66	10,45	13,77	19,82
			9-A-2	0,06	0,22	0,46	0,74	6,80	12,05	15,09	16,12	0,38	0,89	1,26	2,43	7,18	12,94	16,34	18,55
			9-A-3	0,07	0,30	0,63	0,98	6,27	12,05	22,51	24,60	0,73	1,18	2,17	2,76	7,00	13,23	24,68	27,36
			Moyenne	**0,08**	**0,30**	**0,60**	**0,98**	**6,14**	**10,84**	**16,32**	**19,12**	**0,81**	**1,36**	**1,94**	**2,79**	**6,95**	**12,20**	**18,26**	**21,91**
			CV	**0,24**	**0,25**	**0,21**	**0,25**	**0,12**	**0,19**	**0,35**	**0,25**	**0,59**	**0,43**	**0,31**	**0,14**	**0,04**	**0,13**	**0,31**	**0,22**
		#10-A	10-A-1	0,12	0,43	0,58	0,83	0,91	2,74	3,11	3,44	0,17	0,54	1,28	2,49	1,08	3,28	4,39	5,92
			10-A-2	0,13	0,32	0,41	0,51	1,66	3,39	4,23	4,39	0,05	0,35	0,61	1,00	1,71	3,74	4,84	5,39
			10-A-3	0,04	0,24	0,36	0,47	0,28	1,96	2,83	2,09	0,14	0,53	0,57	2,18	0,42	2,49	3,40	4,27
			Moyenne	**0,10**	**0,33**	**0,45**	**0,60**	**0,95**	**2,70**	**3,39**	**3,31**	**0,12**	**0,47**	**0,82**	**1,89**	**1,07**	**3,17**	**4,21**	**5,19**
			CV	**0,49**	**0,28**	**0,25**	**0,32**	**0,72**	**0,27**	**0,22**	**0,35**	**0,51**	**0,23**	**0,49**	**0,42**	**0,60**	**0,20**	**0,17**	**0,16**
		#11-A	11-A-1	0,09	0,17	0,20	0,26	1,67	1,68	1,34	1,17	0,38	1,47	2,04	2,83	2,04	3,15	3,37	4,00
			11-A-2	0,05	0,09	0,12	0,16	1,12	1,26	1,23	1,13	0,29	0,73	1,31	1,78	1,41	1,99	2,54	2,91
			11-A-3	0,06	0,11	0,14	0,27	1,23	1,45	1,40	1,52	0,42	0,96	1,44	2,01	1,65	2,41	2,84	3,54
			Moyenne	**0,07**	**0,12**	**0,15**	**0,23**	**1,34**	**1,47**	**1,32**	**1,27**	**0,36**	**1,05**	**1,60**	**2,21**	**1,70**	**2,52**	**2,92**	**3,48**
			CV	**0,32**	**0,34**	**0,27**	**0,27**	**0,22**	**0,14**	**0,07**	**0,17**	**0,18**	**0,36**	**0,24**	**0,25**	**0,19**	**0,23**	**0,14**	**0,16**
		#13-A	13-A-1	0,12	0,25	0,33	0,51	1,62	1,92	1,26	2,24	1,12	2,84	4,03	4,20	2,74	4,76	5,29	6,44
			13-A-2	0,13	0,21	0,29	0,53	1,04	1,79	1,72	2,48	0,92	1,71	2,69	3,06	1,96	3,50	4,41	5,54
			13-A-3	0,13	0,23	0,31	0,58	1,23	1,50	1,65	2,11	1,36	2,24	3,11	3,68	2,59	3,74	4,75	5,79
			Moyenne	**0,13**	**0,23**	**0,31**	**0,54**	**1,30**	**1,73**	**1,54**	**2,28**	**1,14**	**2,26**	**3,27**	**3,65**	**2,43**	**4,00**	**4,82**	**5,92**
			CV	**0,01**	**0,08**	**0,07**	**0,06**	**0,23**	**0,13**	**0,16**	**0,08**	**0,20**	**0,25**	**0,21**	**0,16**	**0,17**	**0,17**	**0,09**	**0,08**
		#14-A	14-A-1	0,07	0,12	0,17	0,34	1,23	1,79	1,45	2,18	0,96	1,41	1,59	1,88	2,19	3,20	3,04	4,06
			14-A-2	0,05	0,10	0,13	0,21	1,40	1,53	1,62	2,01	0,42	0,72	0,95	1,06	1,82	2,25	2,57	3,07
			14-A-3	0,05	0,10	0,13	0,24	1,23	1,95	2,22	2,56	0,52	1,03	1,15	1,40	1,75	2,98	3,37	3,96
			Moyenne	**0,06**	**0,11**	**0,14**	**0,26**	**1,29**	**1,76**	**1,76**	**2,25**	**0,63**	**1,05**	**1,23**	**1,45**	**1,92**	**2,81**	**2,99**	**3,70**
			CV	**0,19**	**0,09**	**0,14**	**0,27**	**0,07**	**0,12**	**0,23**	**0,12**	**0,45**	**0,33**	**0,27**	**0,28**	**0,12**	**0,18**	**0,13**	**0,15**

Tableau 8.3 - Perte de masse cumulative et résultats d'analyse d'image (dégarnissements et éclatements) pour les granulats de catégorie 3 (propriétés intrinsèques inférieures)

				Résistance à l'écaillage															
		Source granulat	Dalle	Perte de masse (cumulative) [kg/m³]				Analyse d'image											
								Surface dégamie [%]				Surface éclatée ("popout") [%]				Surface totale [%]			
		[-]		7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles	7 cycles	21 cycles	35 cycles	56 cycles
Catégorie 3	Propriétés intrinsèques inférieures	#1-A	1-A-1	0,10	0,15	0,50	0,67	2,35	3,58	3,85	2,79	0,51	0,41	1,12	3,63	2,86	3,99	4,98	6,42
			1-A-2	0,08	0,16	0,47	0,67	1,43	2,31	2,60	1,84	0,71	0,84	1,06	2,40	2,14	3,15	3,66	4,24
			1-A-3	0,16	0,31	0,75	0,96	1,66	2,95	2,78	1,90	0,90	0,98	1,72	3,93	2,56	3,92	4,50	5,83
			Moyenne	**0,11**	**0,21**	**0,57**	**0,77**	**1,81**	**2,95**	**3,08**	**2,18**	**0,71**	**0,74**	**1,30**	**3,32**	**2,52**	**3,69**	**4,38**	**5,50**
			CV	**0,36**	**0,43**	**0,27**	**0,21**	**0,27**	**0,21**	**0,22**	**0,24**	**0,28**	**0,40**	**0,28**	**0,24**	**0,14**	**0,13**	**0,15**	**0,21**
		#6-A	6-A-1	0,09	0,19	0,22	0,25	0,77	1,73	1,77	1,29	0,74	1,63	2,08	2,63	1,50	3,36	3,85	3,92
			6-A-2	0,08	0,17	0,22	0,26	0,30	1,22	1,53	1,12	0,55	1,25	1,95	2,11	0,86	2,47	3,48	3,23
			6-A-3	0,13	0,26	0,34	0,39	0,82	1,69	2,15	1,35	0,52	1,21	1,65	2,30	1,34	2,90	3,80	3,64
			Moyenne	**0,10**	**0,21**	**0,26**	**0,30**	**0,63**	**1,55**	**1,82**	**1,25**	**0,60**	**1,36**	**1,89**	**2,34**	**1,23**	**2,91**	**3,71**	**3,60**
			CV	**0,28**	**0,23**	**0,26**	**0,26**	**0,45**	**0,18**	**0,17**	**0,10**	**0,20**	**0,17**	**0,12**	**0,11**	**0,27**	**0,15**	**0,05**	**0,10**
		#8-A	8-A-1	0,18	0,42	0,66	0,97	3,35	2,27	2,09	1,73	0,71	2,49	4,13	5,31	4,06	4,76	6,22	7,04
			8-A-2	0,08	0,26	0,35	0,48	0,88	1,38	1,47	0,74	1,07	3,05	3,62	4,60	1,96	4,43	5,09	5,34
			8-A-3	0,06	0,21	0,31	0,50	0,50	1,37	1,49	0,97	1,07	2,17	2,66	5,04	1,57	3,54	4,14	6,01
			Moyenne	**0,10**	**0,30**	**0,44**	**0,65**	**1,58**	**1,67**	**1,68**	**1,15**	**0,95**	**2,57**	**3,47**	**4,98**	**2,53**	**4,24**	**5,15**	**6,13**
			CV	**0,62**	**0,38**	**0,44**	**0,43**	**0,98**	**0,31**	**0,21**	**0,45**	**0,22**	**0,17**	**0,22**	**0,07**	**0,53**	**0,15**	**0,20**	**0,14**
		#16-A	16-A-1	0,04	0,10	0,18	0,24	1,44	2,10	1,80	1,95	0,38	0,71	2,22	2,52	1,82	2,81	4,02	4,47
			16-A-2	0,04	0,13	0,23	0,33	1,77	2,51	2,60	2,09	0,93	1,26	2,26	3,74	2,70	3,76	4,86	5,82
			16-A-3	0,07	0,16	0,27	0,38	1,19	2,31	2,25	2,28	1,02	1,39	2,26	2,78	2,20	3,70	4,50	5,06
			Moyenne	**0,05**	**0,13**	**0,22**	**0,32**	**1,46**	**2,31**	**2,22**	**2,10**	**0,78**	**1,12**	**2,24**	**3,01**	**2,24**	**3,42**	**4,46**	**5,12**
			CV	**0,32**	**0,21**	**0,21**	**0,22**	**0,20**	**0,09**	**0,18**	**0,08**	**0,44**	**0,32**	**0,01**	**0,21**	**0,20**	**0,16**	**0,09**	**0,13**

Les résultats des surfaces d'éclatements par catégorie de granulat (catégorie 1 - propriétés supérieures, catégorie 2 - propriétés intermédiaires et catégorie 3 - propriétés inférieures), montrent que les surfaces d'éclatements après 56 cycles de gel/dégel se situent en moyenne à 1,52% pour les granulats de catégorie 1. Au niveau des granulats de catégorie 2 et 3, les surfaces d'éclatements sont à 2,20% et 3,41% respectivement. La figure 8.2 indique une tendance entre la catégorie de granulat et le comportement à l'éclatement.

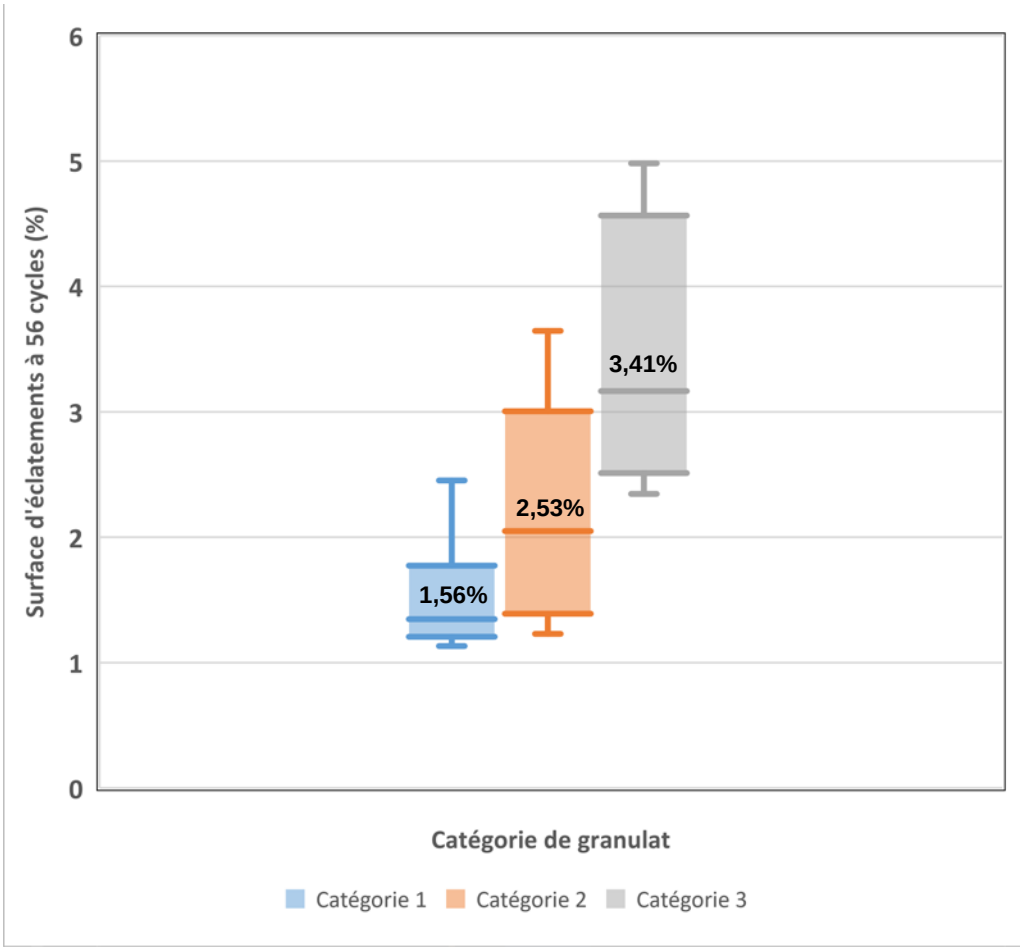


Figure 8.2 - Surface d'éclatements à 56 cycles en fonction de la catégorie de granulats.

Dans le cas des surfaces de dégarnissements ou de la masse des débris, il est plus difficile d'observer un lien avec la catégorie de granulat (voir figures 8.3 et 8.4). Il n'y a pas de corrélation évidente entre le comportement au dégarnissement ou la perte de masse à l'écaillage et les propriétés intrinsèques du granulat. Globalement, les résultats suggèrent que les granulats avec les propriétés intrinsèques supérieures et intermédiaires (catégories 1 et 2) montrent une tendance au dégarnissement plutôt qu'à l'éclatement. Cette tendance semble inversée pour les granulats de catégorie 3 (propriétés intrinsèques inférieures).

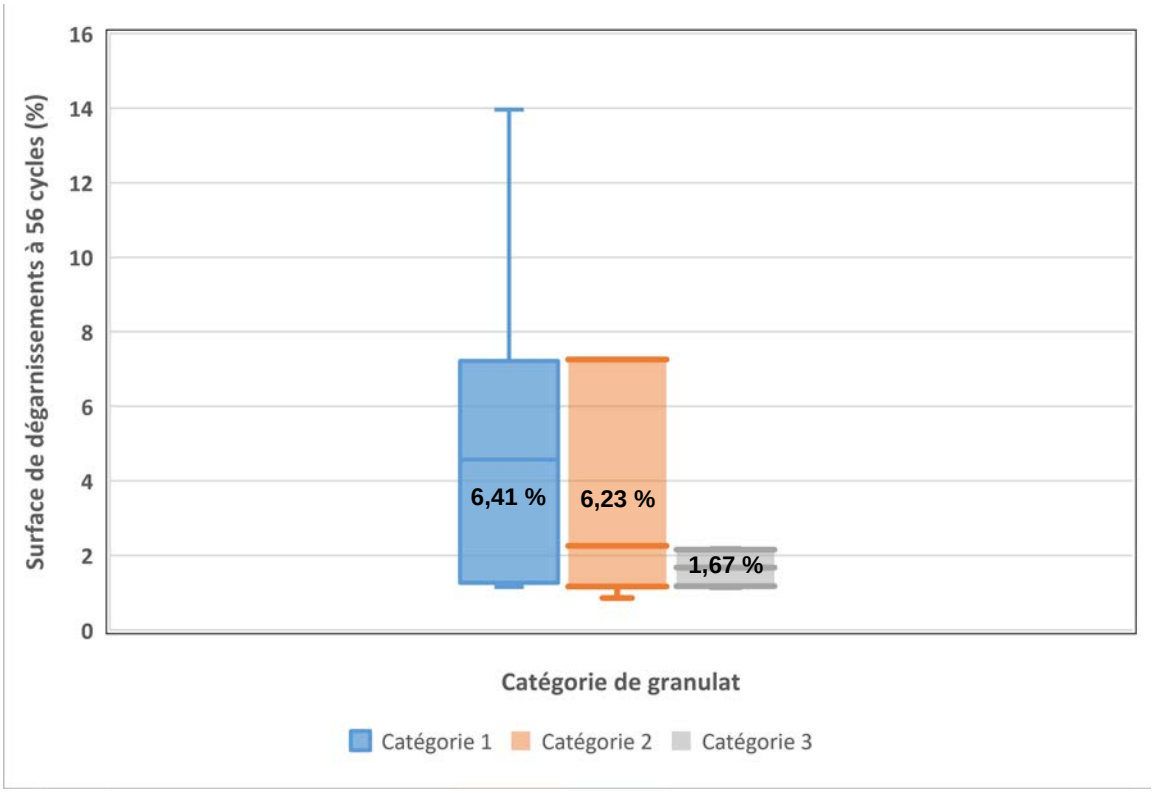


Figure 8.3 - Surface de dégarnissements à 56 cycles en fonction de la catégorie de granulats

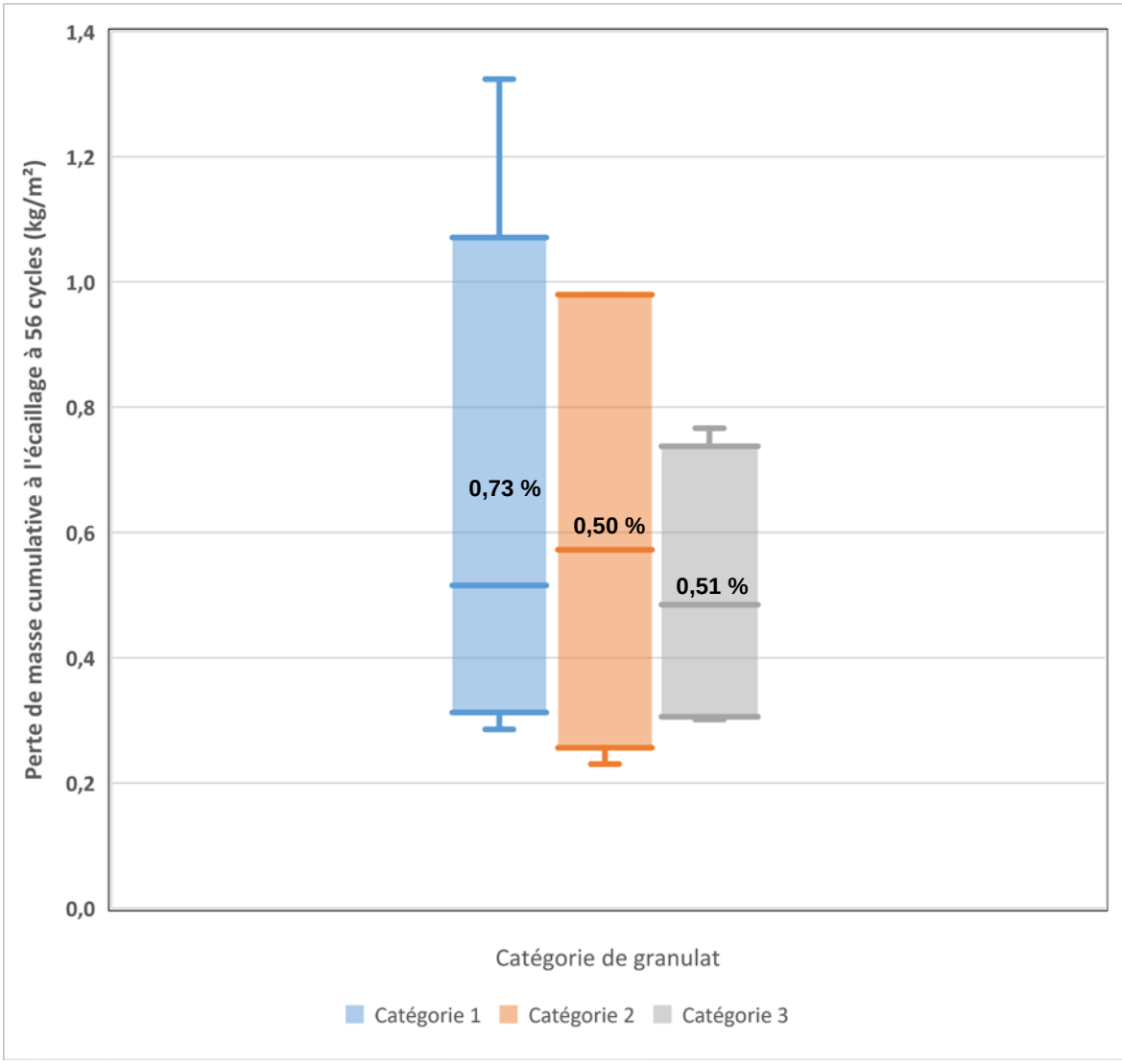


Figure 8.4 - Perte de masse cumulative à 56 cycles en fonction de la catégorie de granulats

Les 17 sources granulaires ont été utilisées telles qu'échantillonnées pour la fabrication des bétons (aucun lavage). Comme certaines sources avaient plus de particules fines en surface (principalement des particules provenant du processus de concassage), l'influence de ce paramètre a été étudiée avec une deuxième série. Cette seconde série d'essais a été réalisée pour mieux comprendre l'effet du lavage du granulat sur la résistance à l'écaillage. Les granulats sélectionnés, en collaboration avec le ministère, sont ceux qui ont présenté une résistance plus faible à l'écaillage lors de la première série soit les granulats : 1A, 2A, 4A ,7A, 8A et 9A. Par contre, ces granulats n'ont pas nécessairement un pourcentage de particules passant le 80 microns (*CSA A23.2-5A*) plus élevé en comparaison avec l'ensemble des granulats. La moyenne des particules passants le 80 microns est de 1,71 % pour l'ensemble des 17 sources tandis qu'elle est de 1,48% pour les 6 granulats de la seconde série. Les résultats de la seconde série sont présentés à la section 8.2. Une analyse plus détaillée des résultats est présentée au chapitre 11, notamment en fonction de l'essai micro-Deval et de gel-dégel non confiné.

8.2 GRANULATS LAVÉS

Comme mentionné précédemment, une seconde série de plaques d'écaillage a été réalisée en utilisant des granulats lavés pour la fabrication des bétons. La figure 8.5 présente la masse des débris cumulée pour chacune des sources lavées et non lavées en fonction du nombre de cycles. Ces résultats montrent que pour la plupart des sources, le nettoyage du granulat a eu un impact favorable sur la résistance à l'écaillage. Pour l'ensemble des sources, sauf 7A, les granulats lavés ont une masse de débris plus faible. L'écart est particulièrement important pour les sources 4A et 2A. La source 4A non lavée une masse de débris de 1,35 kg/m^2 alors que celle de la source lavée est plus faible à 0,24 kg/m^2. La tendance est la même pour la source 2A (1,08 kg/m^2 et 0,25 kg/m^2 respectivement pour l'état non lavé et lavé).

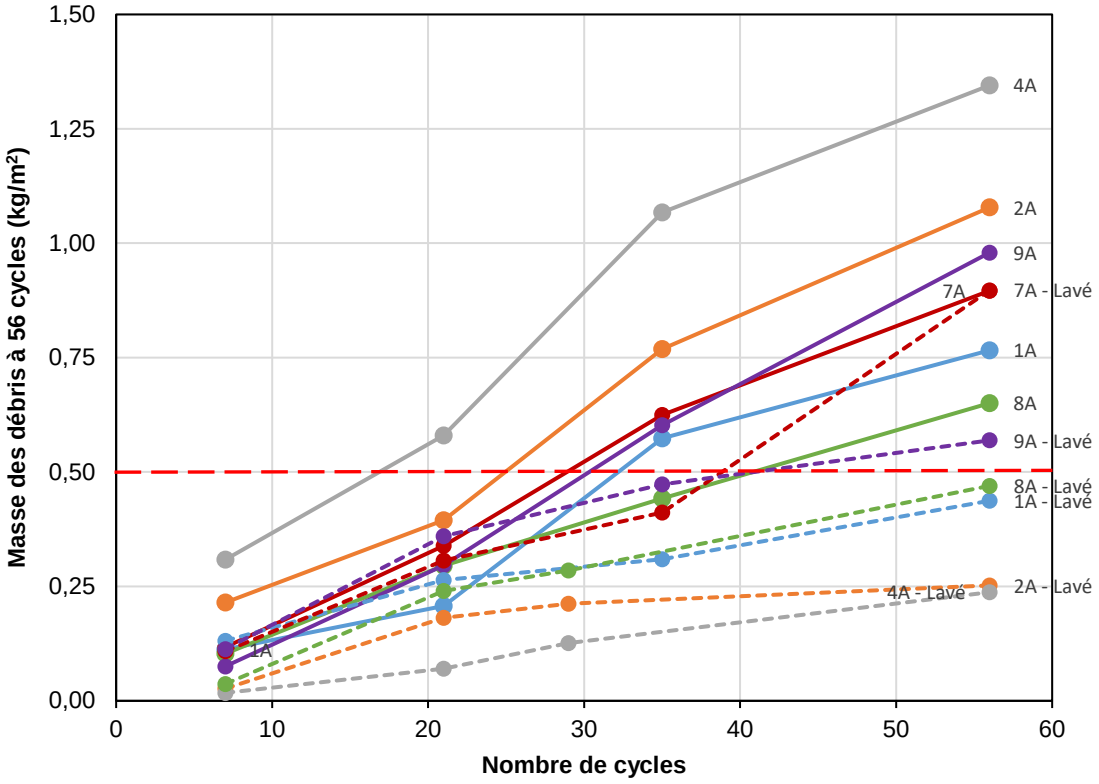


Figure 8.5 - Masse des débris cumulée (kg/m^2) des sources lavés et non lavés en fonction du nombre de cycles

Le tableau 8.4 présente les masses de débris cumulatives à l'écaillage pour chacune des plaques et les résultats d'analyse d'image (surfaces de granulats dégarnis et éclatés) pour les granulats lavés selon la méthode décrite à la section 7.4.

En comparant les surfaces de dégarnissements et d'éclatement entre un granulat lavé et non lavé (Figure 8.6), on constate que le lavage semble réduire la tendance d'un granulat à dégarnir pour les sources 2A, 4A et 9A. Par contre, le lavage ne semble pas modifier le comportement à l'éclatement. Pour les sources 1A, 7A et 8A, l'impact du lavage est peu significatif sur les surfaces de dégarnissements et d'éclatements.

Tableau 8.4 - Masse des débris cumulative et résultats d'analyse d'image (dégarnissements et éclatements) pour les granulats lavés

				Résistance à l'écaillage															
		Source granulat	**Dalle**	**Perte de masse (cumulative) [kg/m³]**				**Analyse d'image**											
								Surface dégarnie [%]				**Surface éclatée ("*popout*") [%]**				**Surface totale [%]**			
		[-]		**7 cycles**	**21 cycles**	**35 cycles**	**56 cycles**	**7 cycles**	**21 cycles**	**35 cycles**	**56 cycles**	**7 cycles**	**21 cycles**	**35 cycles**	**56 cycles**	**7 cycles**	**21 cycles**	**35 cycles**	**56 cycles**
Granulats lavés	Propriétés Intrinsèques supérieures	**#2-A-Lavé**	**2-A-L-1**	*0,03*	*0,21*	*0,24*	*0,29*	*0,68*	*0,70*	*2,81*	*4,49*	*0,11*	*0,11*	*0,51*	0,94	0,79	0,81	3,32	5,43
			2-A-L-2	*0,03*	*0,18*	*0,22*	*0,26*	*0,68*	*0,67*	*3,21*	*5,10*	*0,21*	*0,21*	*0,65*	0,96	0,89	0,88	3,87	6,05
			2-A-L-3	*0,02*	*0,15*	*0,18*	*0,21*	*0,46*	*0,46*	*2,04*	*3,04*	*0,26*	*0,26*	*0,69*	1,25	0,72	0,72	2,73	4,29
			Moyenne	***0,03***	***0,18***	***0,21***	***0,25***	***0,60***	***0,61***	***2,69***	***4,21***	***0,19***	***0,19***	***0,62***	***1,05***	***0,80***	***0,80***	***3,31***	***5,26***
			CV	***0,24***	***0,18***	***0,16***	***0,17***	***0,21***	***0,22***	***0,22***	***0,25***	***0,39***	***0,39***	***0,15***	***0,16***	***0,11***	***0,10***	***0,17***	***0,17***
		#4-A-Lavé	**4-A-L-1**	*0,02*	*0,08*	*0,12*	*0,18*	*0,33*	*0,33*	*0,42*	*0,66*	*0,10*	*0,10*	*0,19*	0,57	0,42	0,42	0,61	1,22
			4-A-L-2	*0,01*	*0,07*	*0,10*	*0,24*	*0,28*	*0,28*	*0,32*	*0,57*	*0,11*	*0,11*	*0,44*	0,82	0,39	0,39	0,75	1,40
			4-A-L-3	*0,01*	*0,05*	*0,15*	*0,28*	*0,07*	*0,07*	*0,42*	*0,81*	*0,20*	*0,20*	*0,35*	0,80	0,26	0,26	0,77	1,61
			Moyenne	***0,02***	***0,07***	***0,12***	***0,24***	***0,22***	***0,22***	***0,39***	***0,68***	***0,14***	***0,14***	***0,32***	***0,73***	***0,36***	***0,36***	***0,71***	***1,41***
			CV	***0,27***	***0,21***	***0,17***	***0,22***	***0,62***	***0,62***	***0,16***	***0,18***	***0,39***	***0,39***	***0,39***	***0,19***	***0,24***	***0,24***	***0,12***	***0,14***
		#7-A-Lavé	**7-A-L-1**	*0,08*	*0,11*	*0,23*	*0,65*	*2,03*	*3,47*	*4,45*	*7,64*	*0,15*	*0,27*	*0,46*	0,59	2,19	3,75	4,90	8,24
			7-A-L-2	*0,10*	*0,38*	*0,45*	*0,97*	*1,90*	*4,40*	*5,10*	*8,62*	*0,12*	*0,21*	*0,31*	0,53	2,02	4,61	5,41	9,14
			7-A-L-3	*0,13*	*0,40*	*0,52*	*0,98*	*1,89*	*4,31*	*5,53*	*8,12*	*0,26*	*0,51*	*0,73*	0,91	2,15	4,82	6,26	9,03
			Moyenne	***0,10***	***0,30***	***0,40***	***0,87***	***1,94***	***4,06***	***5,02***	***8,13***	***0,18***	***0,33***	***0,50***	***0,67***	***2,12***	***4,39***	***5,52***	***8,80***
			CV	***0,22***	***0,53***	***0,38***	***0,22***	***0,04***	***0,13***	***0,11***	***0,06***	***0,43***	***0,47***	***0,44***	***0,30***	***0,04***	***0,13***	***0,12***	***0,06***
	Propriétés Intrinsèques Intermédiaires	**#9-A-Lavé**	**9-A-L-1**	*0,11*	*0,35*	*0,48*	*0,56*	6,20	*9,46*	*9,60*	9,09	0,43	*0,71*	*4,37*	4,76	6,62	10,17	13,96	13,85
			9-A-L-2	*0,11*	*0,29*	*0,38*	*0,45*	*6,39*	*9,83*	*9,26*	*8,86*	*0,32*	*0,63*	*3,11*	3,90	6,72	10,46	12,36	12,76
			9-A-L-3	*0,11*	*0,41*	*0,52*	*0,65*	*4,70*	*8,04*	*7,77*	*7,84*	*0,42*	*0,70*	*3,18*	3,15	5,12	8,74	10,94	10,99
			Moyenne	***0,11***	***0,35***	***0,46***	***0,55***	***5,76***	***9,11***	***8,87***	***8,59***	***0,39***	***0,68***	***3,55***	***3,94***	***6,15***	***9,79***	***12,42***	***12,53***
			CV	***0,03***	***0,17***	***0,15***	***0,18***	***0,16***	***0,10***	***0,11***	***0,08***	***0,15***	***0,07***	***0,20***	***0,20***	***0,15***	***0,09***	***0,12***	***0,11***
	Propriétés Intrinsèques Inférieures	**#1-A-Lavé**	**1-A-L-1**	*0,13*	*0,25*	*0,30*	*0,41*	1,04	*0,63*	*0,75*	1,03	*0,97*	*2,42*	*2,96*	3,59	2,01	3,05	3,71	4,62
			1-A-L-2	*0,10*	*0,23*	*0,28*	*0,43*	*1,42*	*1,04*	*1,32*	*1,20*	*0,39*	*1,74*	*2,24*	3,09	1,81	*2,77*	3,57	4,28
			1-A-L-3	*0,15*	*0,28*	*0,31*	*0,42*	*0,79*	*1,62*	*1,54*	*0,82*	*0,42*	*0,77*	*1,39*	2,75	1,22	2,38	2,94	3,57
			Moyenne	***0,13***	***0,25***	***0,30***	***0,42***	***1,09***	***1,09***	***1,20***	***1,01***	***0,59***	***1,64***	***2,20***	***3,14***	***1,68***	***2,73***	***3,40***	***4,16***
			CV	***0,23***	***0,10***	***0,06***	***0,02***	***0,29***	***0,46***	***0,34***	***0,19***	***0,55***	***0,51***	***0,36***	***0,14***	***0,25***	***0,12***	***0,12***	***0,13***
		#8-A-Lavé	**8-A-L-1**	*0,05*	*0,38*	*0,43*	*0,88*	0,43	*0,67*	*0,74*	*0,88*	*0,22*	*0,22*	*2,54*	4,45	0,65	0,90	3,28	5,33
			8-A-L-2	*0,03*	*0,13*	*0,16*	*0,23*	*0,35*	*0,35*	*0,48*	*0,56*	*0,44*	*0,44*	*1,64*	2,05	0,79	0,78	2,12	2,61
			8-A-L-3	*0,04*	*0,20*	*0,26*	*0,29*	*0,35*	*0,35*	-	*0,79*	*0,86*	*0,86*	-	3,95	1,21	1,21	-	4,74
			Moyenne	***0,04***	***0,24***	***0,28***	***0,47***	***0,37***	***0,46***	***0,61***	***0,74***	***0,51***	***0,51***	***2,09***	***3,48***	***0,88***	***0,96***	***2,70***	***4,22***
			CV	***0,31***	***0,53***	***0,48***	***0,76***	***0,12***	***0,41***	***0,62***	***0,22***	***0,64***	***0,64***	***0,62***	***0,36***	***0,33***	***0,23***	***0,62***	***0,34***

: Mesures prises à 29 cycles au lieu de 35 cycles (Bris de la chambre d'écaillage)

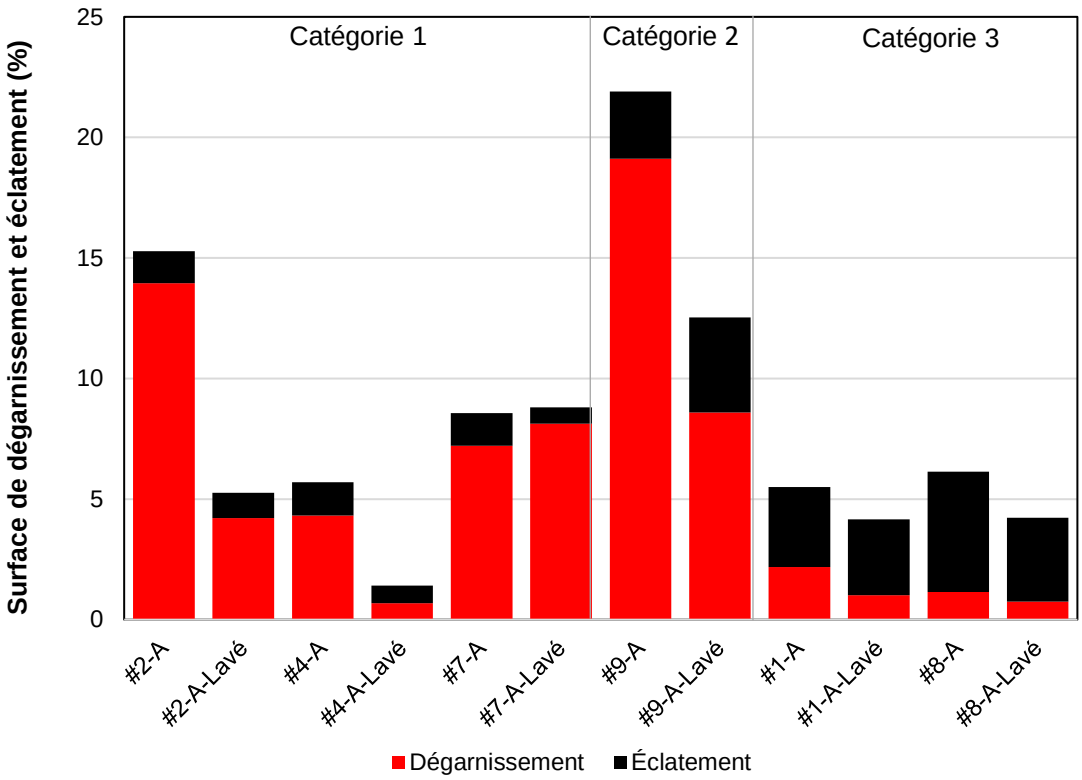


Figure 8.6 - Comparaison des surfaces de dégarnissement et éclatement entre les sources lavées et non lavées

9 RÉSULTATS DES ESSAIS D'ÉCAILLAGE RÉALISÉS AVEC LE SOUS-ENSEMBLE DE SEPT SOURCES GRANULAIRES

9.1 CHOIX ET CLASSEMENT DES SEPT SOURCES GRANULAIRES

Les résultats des essais de caractérisation des granulats provenant des 17 sources granulaires sont présentés au Tableau 9.1. Ces essais ont été réalisés par trois différents laboratoires numérotés 1, 2 et 3. Globalement, les résultats du Tableau 9.1 montrent que le choix de ces 17 sources granulaires couvre une grande plage de performance du point de vue des pertes aux essais de gel-dégel non confiné et micro-Deval. Par exemple, pour l'essai de gel-dégel non confiné, les valeurs sont comprises entre 0 et 12 %. Pour l'essai micro-Deval, les valeurs sont comprises entre 2 et 21 %.

La Figure 9.1 présente les plages de variation des pertes massiques micro-Deval et au gel-dégel non confiné pour l'ensemble des sources granulaires. Pour chaque source on indique la moyenne, le minimum et le maximum obtenus par les trois laboratoires mandatés pour réaliser les essais. Le choix des sources couvre assez bien l'ensemble des combinaisons gel-dégel non confiné et micro-Deval. Les sources granulaires avec une perte au micro-Deval inférieure à 10 % ont une perte au gel-dégel inférieure à 7 %. À l'inverse les sources granulaires avec un micro-Deval supérieur à 10 % peuvent avoir une perte au gel-dégel non confiné très variable, comprise entre moins de 2 % et plus de 10 %.

Pour une source granulaire donnée, l'écart entre les valeurs maximale et minimale est plus important pour la perte au gel-dégel non confiné que pour la perte au micro-Deval. La réponse de l'essai au gel-dégel non confiné semble donc un peu moins précise. Le laboratoire 2 a systématiquement obtenu les valeurs les plus faibles de gel-dégel non confiné.

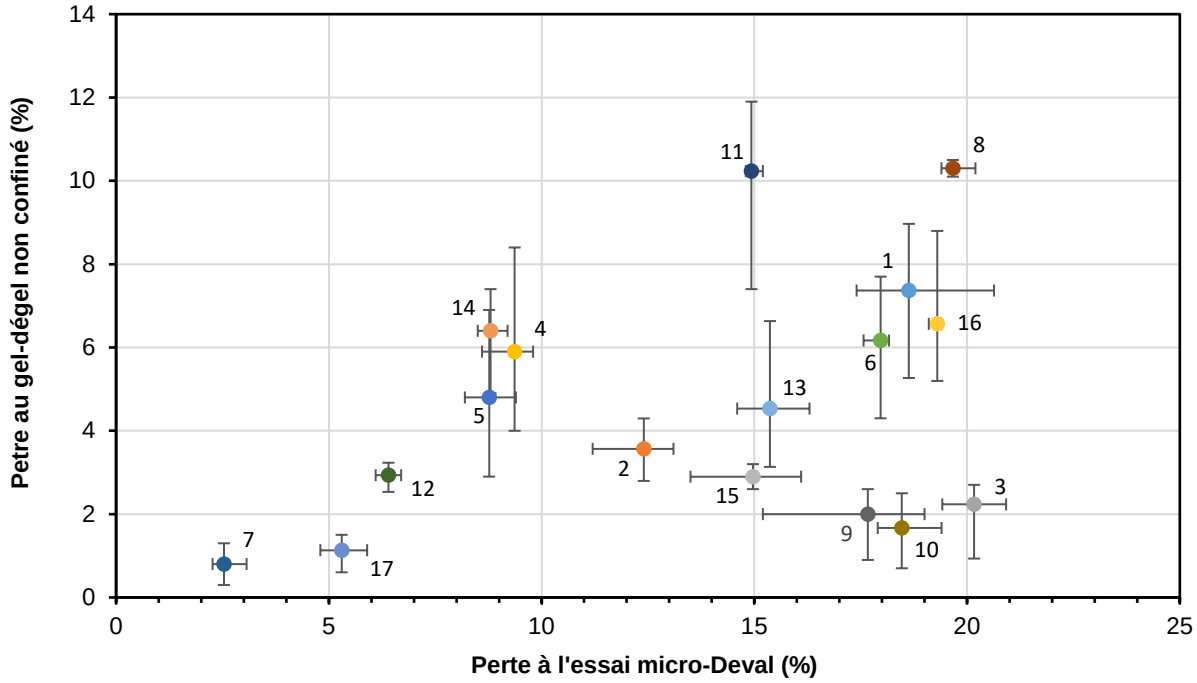


Figure 9.1 - Pertes aux essais de gel-dégel non confiné et micro-Deval de toutes les sources granulaires

Tableau 9.1 - Caractérisation complète selon le tableau 12 de la norme CSA A23.1 des sources granulaires étudiées

Essai	Norme	Laboratoire	Source															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Gel-dégel non confiné (%)	CSA A23.2-24A	Laboratoire 1	7,8	3,6	2,7	5,3	6,9	6,5	0,8	10,5	2,5	2,5	11,4	3,2	6,6	7,4	3,5	8,8	1,3
		Laboratoire 2	5,3	2,8	1,2	4	4,6	4,3	0,3	4,5*	0,9	0,7	7,4	2,5	3,1	4,9	2,9	5,2	0,6
		Laboratoire 3	9	4,3	2,8	8,4	2,9	7,7	1,3	10,1	2,6	1,8	11,9	3,1	3,9	6,9	2,3	5,7	1,5
		Moyenne	7,4	3,6	2,2	5,9	4,8	6,2	0,8	10,3	2,0	1,7	10,2	2,9	4,5	6,4	2,9	6,6	1,1
micro-Deval (%)	CSA A23.2-29A	Laboratoire 1	20,8	12,9	20,9	9,7	9,4	18,1	2,6	20,2	19	19,4	14,8	6,4	16,3	8,5	16,1	19,1	5,9
		Laboratoire 2	17,7	13,1	20,1	9,8	8,7	18,2	2,8	19,4	18,8	17,9	15,2	6,7	14,6	9,2	13,5	19,4	5,2
		Laboratoire 3	17,4	11,2	19,5	8,6	8,2	17,6	2,2	19,4	15,2	18,1	14,8	6,1	15,2	8,7	15,3	19,4	4,8
		Laboratoire 4	18,3	10,1	19,8	8,3	7,8	17,1	2,1	18,6	-	18,2	15,6	6,1	13,6	6,8	14,3	21,1	4,2
		Moyenne**	18,6	12,4	20,2	9,4	8,8	18,0	2,5	19,7	17,7	18,5	14,9	6,4	15,4	8,8	15,0	19,3	5,3
$MgSO_4$	CSA A23.2-9A	Laboratoire 1	5,1	2,7	2	1,6	1,1	2,2	0,3	4,7	0,5	0,7	2,7	0,1	5,7	6	1	7,4	0,5
		Laboratoire 2	5,18	7,86	1,75	2,28	1,16	4,01	0,5	6,45	0,61	0,59	2,46	0,52	4,14	4,86	0,71	3,08	0,9
		Moyenne	5,14	5,28	1,875	1,94	1,1	3,105	0,4	5,575	0,555	0,645	2,58	0,31	4,92	5,43	0,855	5,24	0,7
Los Angeles	CSA A23.2-16A	Laboratoire 3	21,6	39,7	36,3	12,0	19,9	26,9	12,2	22,8	24,8	31,7	23,1	17,8	23,1	18,3	18,6	28,8	22,5
		Laboratoire 4	21,9	36,7	39,8	13,0	18,5	27,2	10,9	23,2	27,2	35,6	25,8	17,6	22,1	22,1	17,5	29,3	21,3
		Moyenne	21,8	38,2	38,1	12,5	19,2	27,1	11,6	23,0	26,0	33,7	24,5	17,7	22,6	17,5	18,1	29,1	21,9
Densité	CSA A32.2-6A	Laboratoire 4	2,68	2,64	2,68	2,87	2,79	2,71	2,52	2,67	2,70	2,71	2,70	2,82	2.74	2,89	2,72	2,71	2,63
Absorption (%)		Laboratoire 4	0,85	0,98	0,55	1,20	0,60	0,60	0,50	1,41	0,70	0,50	0,50	0,62	0,80	0,90	0,70	0,80	0,50
Part. fines passant 80µm (g)	CSA A23.2-5A	Laboratoire 3	1,6	1,8	2	1,4	2,3	3,1	0,7	2,1	1,3	1,7	1,3	1,6	2,5	0,9	1,9	1,4	1,5
Part. légères	CSA A23.2-4A	Laboratoire 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mottes d'argile et part. friable	CSA A23.2-3A	Laboratoire 3	0,7	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,1	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4	0,5	0,3
Part. plates	CSA A23.2-13A	Laboratoire 3	20,8	11,8	18	11,7	17,3	12,7	11,7	19,7	20,8	18	8,4	15,4	41,9	11,6	23,8	13,7	18,7
Part. allongées	CSA A23.2-13A	Laboratoire 3	51,8	40,1	32,1	30,5	25,6	31	28,2	36,5	38	45,3	22,4	32,9	62,6	35,6	43,3	34,3	32,3
Part. plates et allongées	CSA A23.2-13A	Laboratoire 3	11,5	3,8	4,8	2,9	3,9	2,4	2,6	4,3	6,9	4,6	1,3	4,5	3,1	3,8	10,4	2,3	6,2
Nombre pétrographique	CSA A23.2-15A	Laboratoire 3	145	124	122	101	105	129	100	152	139	121	137	112	118	103	111	118	105
		Laboratoire 4	146	136	113	106	112	124	107	146	159	126	136	120	121	100	123	123	123

*Valeur non prise en compte dans le calcul de la moyenne

** La moyenne est calculée à partir des valeurs des laboratoires 1 à 3 inclusivement

Une analyse des valeurs du Tableau 9.1 fait ressortir quelques points saillants :

- Le granulat de la source 7 montre les pertes massiques les plus faibles tant pour le gel-dégel non confiné que pour le micro-Deval (0,8 % et 2,5 % respectivement).
- Le granulat de la source 3 possède la plus forte perte à l'essai micro-Deval (20,2 %) mais une des plus faibles pertes au gel-dégel non confiné (2,2 %).
- Le granulat de la source 11 possède la plus forte perte à l'essai de gel-dégel non confiné (10,2 %).
- Le granulat de la source 8 possède les pertes totales combinées les plus élevées pour les essais de gel-dégel non confiné et micro-Deval (7,1 % + 19,7 % = 26,8 %).
- Les deux pierres d'origine volcanique (source 4 et 14) possèdent des pertes faibles à l'essai micro-Deval (< 10 %), mais des pertes élevées à l'essai de gel-dégel non confiné (5,9 % et 6,4 % respectivement).

La Figure 9.2 montre les pertes à l'essai micro-Deval et les pertes au gel-dégel non confiné des 17 sources granulaires. Elle indique aussi les pertes maximales permises dans le cas d'un béton exposé au gel, soit 17 % pour l'essai micro-Deval et 6 % pour l'essai de gel-dégel non confiné (Tableau 12 de la norme CSA A23.1). Dans le cas des calcaires et des dolomies des Basse-Terre du Saint-Laurent, les notes prescriptives du Tableau 12 permettent une perte maximale de 19 % pour l'essai micro-Deval et de 9 % pour l'essai de gel-dégel non confiné. Ces deux zones ombragées sont indiquées sur la Figure 9.2

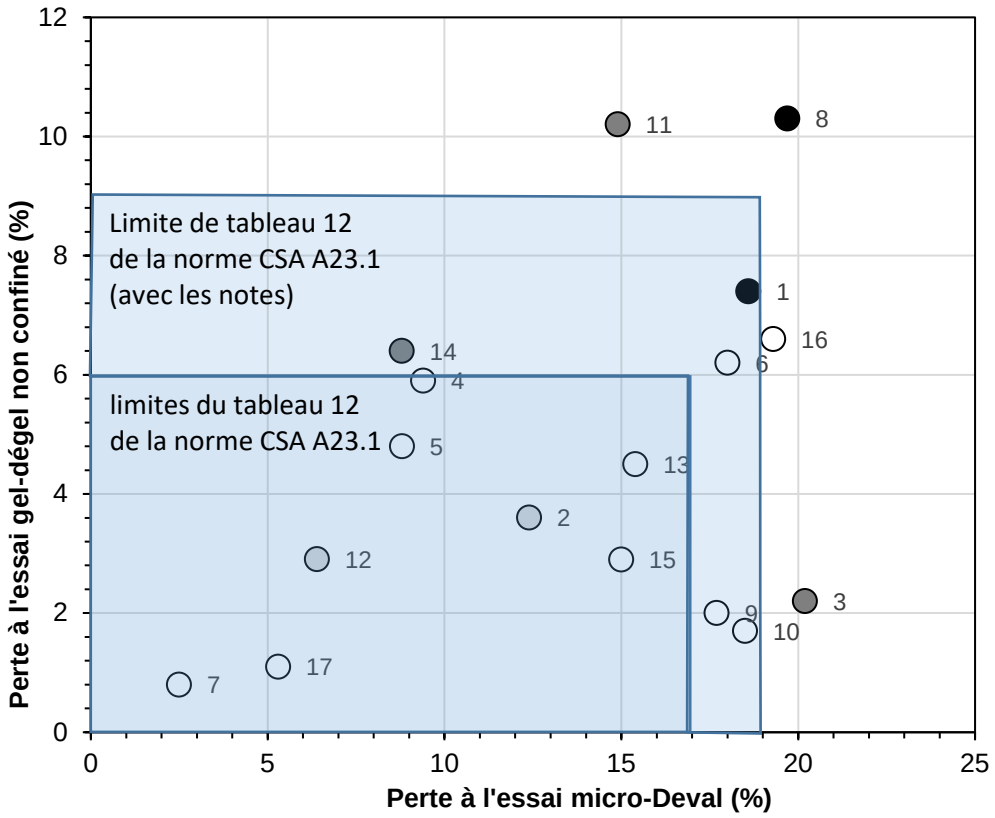


Figure 9.2 - Limites du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 et pertes aux essais de gel-dégel non confiné et micro-Deval de toutes les sources granulaires

Les données de la Figure 9.2 indiquent que les sources 2, 4, 5, 7, 12, 13, 15 et 17 sont dans les limites du Tableau 12 de la norme. Les sources 1, 6, et 10 sont dans les limites du Tableau 12 mais en incluant les notes spécifiques aux calcaires et aux dolomies des Basse-Terre du Saint-Laurent. Les sources 3, 8, 9, 11, 14 et 16 sont à l'extérieur des limites du Tableau 12 de la norme (les sources 9 et 14 n'étant pas des calcaires). Les sept sources dont les marqueurs sont sur fond gris ou noir sont celles qui ont été sélectionnées pour cette partie de l'étude (phases 1 à 6).

C'est sur la base des résultats du Tableau 9.1 qu'ont été choisies les sept sources granulaires ayant fait l'objet de l'analyse détaillée de la durabilité à l'écaillage. Trois catégories de performance ont été définies : supérieure, intermédiaire et inférieure. Elles ne correspondent pas nécessairement aux trois plages identifiées sur la Figure 9.2.

La catégorie supérieure (numéro 1) regroupe les sources granulaires 2 et 12:

- Ces sources sont indiquées avec des marqueurs gris pâle sur la Figure 9.2
- Le granulat de la source 2 est une pierre de type granitique. La perte moyenne au micro-Deval est de 12,4 %, ce qui est très inférieur à la limite maximale de 17 % de la norme CSA. La perte moyenne au gel-dégel non confiné est de 3,6 %, ce qui est inférieur à la limite maximale de 6 % de la norme CSA.
- Le granulat de la source 12 est une pierre de type dolomie. Les pertes moyennes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné sont respectivement de 6,4 % et 2,9 %, ce qui est nettement inférieur aux limites maximales de la norme CSA de 19 % et 9 % respectivement (en incluant les notes spécifiques aux calcaires et aux dolomies des Basses-Terre du Saint-Laurent).

Globalement, cette catégorie regroupe deux pierres de qualité supérieure qui comporte une source d'origine magmatique (plutonique) et une source d'origine sédimentaire. Les nombres pétrographiques sont 123 en moyenne, soit une qualité passable pour la production de béton selon tableau A3.1 de la norme 15A, non recommandé pour les bétons de type C1, C2, F1, C-XL, A-XL, A-1 et A-2..

La catégorie intermédiaire (numéro 2) regroupe les sources granulaires 3, 11 et 14:

- Ces sources sont indiquées avec des marqueurs gris foncé sur la Figure 9.2
- Le granulat de la source 3 est un calcaire qui possède une perte au gel-dégel non confiné très faible (2,2 %) mais une perte moyenne au micro-Deval parmi les plus élevées (20,2 %, au-delà des exigences fixées par la norme CSA). Cette pierre a été choisie en raison de cette particularité unique.
- Le granulat de la source 11 est un calcaire qui montre la perte moyenne au gel-dégel non confiné la plus élevée (10,2 %, au-delà des exigences fixées par la norme CSA) mais une perte moyenne au micro-Deval (14,9 %) de niveau intermédiaire, qui respecte l'exigence du tableau 12 même sans les notes spécifiques aux calcaires et dolomies des Basses-Terres du Saint-Laurent. Cette pierre a été choisie en fonction de cette particularité spécifique.
- Le granulat de la source 14 est une roche volcanique correspondant à un basalte. Les pertes moyennes au gel-dégel non confiné et au micro-Deval se situent au niveau intermédiaire par rapport à l'ensemble des 17 sources de cette étude (6,4 %, au-delà des exigences fixées par la norme CSA, et 8,8 % respectivement). Ce granulat a principalement été choisi dans la classe intermédiaire car il ne respecte pas l'exigence pour le gel-dégel

non confiné (les notes ne s'appliquent pas pour cette source), alors qu'il possède un bon micro-Deval.

Globalement, cette catégorie regroupe trois pierres de qualité intermédiaire, soit deux pierres calcaires et un basalte. Elle reflète donc une certaine diversité minéralogique. Sur la base des nombres pétrographiques, cette catégorie regroupe deux sources de qualité jugée « bonne » (pierre 3 : NP_{moy} = 118 et pierre 14 : NP_{moy} = 102) et une source de qualité jugée « passable » (pierre 11 : NP_{moy} = 137).

La catégorie inférieure (numéro 3) regroupe les sources granulaires 1 et 8:

- Ces sources sont indiquées avec des marqueurs noirs sur la Figure 9.2
- Le granulat de la source 1 est un calcaire dont les pertes moyennes au gel-dégel non confiné (7,4 %) et au micro-Deval (18,6 %) sont relativement proches des valeurs limites maximales de 9 et 19 % respectivement (en incluant les notes spécifiques aux calcaires et dolomies des Basses-Terres du Saint-Laurent).
- Le granulat de la source 8 est un calcaire dont les pertes moyennes au gel-dégel non confiné (10,3 %) et au micro-Deval (19,7 %) sont parmi les plus élevées de cette étude. La perte micro-Deval et la perte au gel-dégel sont supérieures aux valeurs maximales de la norme CSA.

Globalement, cette catégorie regroupe deux pierres calcaires de qualité inférieure. Les NP (source 1 : 146 et source 8 : 149) sont jugés de qualité physico-mécanique « médiocre » pour la production de béton.

Tableau 9.2 - Catégories et choix des sept sources granulaires pour les phases 1 à 6

Catégorie	Source	Minéralogie	Gel-dégel non confiné (%)	Micro-Deval (%)	Nombre Pétrographique
1	2	Granitique	3,6	12,4	130
	12	Dolomie	4,0	5,4	116
2	3	Calcaire	2,2	20,2	118
	14	Basalte	6,4	8,8	102
	11	Calcaire	10,2	14,9	137
3	8	Calcaire	10,3	19,7	149
	1	Calcaire	7,4	18,6	146

9.2 DÉTAILS DU PROGRAMME D'ESSAIS AVEC LES SEPT SOURCES GRANULAIRES (PHASES 1 À 6)

Phase 1 - Étude de la durabilité à l'écaillage de bétons de type V-S produits avec des gros granulats de calibre 5-20 mm

Le but de la phase 1 est d'étudier la relation entre la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement des particules de gros granulat et les réponses aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné. Dans un premier temps, sept sources ont été choisies afin d'atteindre cet objectif. Elles comprennent deux sources de catégorie 1 (2 et 12), trois sources de catégorie 2 (3, 11 et 14) et deux sources de catégorie 3 (1 et 8). Pour chacune des trois catégories précédentes, le choix des sources granulaires a été effectué en

s'assurant de bien refléter la diversité des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des granulats à béton produits au Québec.

Les bétons de cette Phase 1 sont formulés selon les exigences d'un béton de Type V-S présenté au Tableau 9.3. Tous les bétons ont été fabriqués avec un liant ternaire de type GUb-S/SF. Le dosage en liant est de 385 kg/m^3 pour tous les bétons. Un superplastifiant de type polynaphtalène sulfonate et un agent entraîneur d'air sont utilisés dans tous les bétons. Les dosages en superplastifiant et agent entraîneur d'air varient entre chaque gâchée afin d'obtenir un affaissement de 130 ± 30 mm, un volume d'air compris entre 5 et 8 %.

Tableau 9.3 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 1

Type de liant	-	GUb-S/SF
f'c à 28 jours	MPa	35
Dosage en liant	kg/m^3	385
Eau/liant	-	0,40
Calibre du gros granulat	mm	5-20
Teneur en air	%	5 à 8
Affaissement	mm	130 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230
Type de superplastifiant	-	Polynaphtalène

Pour tous les bétons, trois paires de plaques d'écaillage ont été produites pour permettre l'étude de l'influence des variations de température dans la chambre froide, soit une paire à gauche, une paire au centre et une paire à droite. Toutes les plaques d'écaillage ont subi le même mûrissement prescrit par la procédure d'essai BNQ 2621-905 Annexe B :

- 24 heures de conservation dans le moule avec protection contre l'évaporation
- 13 jours de conservation dans une chambre humide à 100 % d'humidité
- 14 jours de séchage à l'air dans le laboratoire
- 7 jours de présaturation avec la solution saline

La masse de débris, la caractérisation des dégarnissements et éclatements et une photo de la surface exposée ont été prises après 0, 7, 21, 35 et 56 de gel-dégel, tel que spécifié dans la norme BNQ 2621-905 Annexe B. Pour chaque béton, sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués. Six cylindres seront utilisés pour mesurer la résistance à la compression à 7 et 28 jours (selon la norme CSA A23.2-9C). Le dernier sera utilisé pour déterminer les caractéristiques du réseau d'air entraîné (selon la norme ASTM C457)

Phase 2 - Étude de l'influence de la dimension maximale du gros granulat sur la durabilité à l'écaillage du béton et du gros granulat

Cette phase a pour but de reproduire la formulation de la phase précédente en ne changeant qu'un paramètre : le calibre des gros granulats. Ainsi, au lieu d'un calibre 5-20 mm, les gros granulats seront tamisés afin d'obtenir un calibre 5-14 mm. Les sources granulaires de la phase 2 sont : 1, 3, 8 et 11.

Le programme de la phase 2 comporte quatre bétons fabriqués avec les granulats de catégories 2 et 3. Les deux sources granulaires de la catégorie 1 n'ont pas été utilisées, car il a été estimé que l'influence de la

taille des particules serait vraisemblablement négligeable compte tenu du très bon potentiel de durabilité de ces deux sources. Le Tableau 9.4 présente les propriétés de la formulation des bétons de la phase 2.

Tableau 9.4 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 2

Type de liant	-	GUb-S/SF
f'c à 28 jours	MPa	35
Dosage en liant	kg/m^3	385
Eau/liant	-	0,40
Calibre du gros granulat	mm	5-14
Teneur en air	%	5 à 8
Affaissement	mm	130 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230
Type de superplastifiant	-	Polynaphtalène

Comme pour la phase précédente, sept cylindres (100 x 200 mm) ont été fabriqués pour chaque gâchée : six pour les essais de résistance à la compression à 7 et 28 jours et un pour la mesure des caractéristiques du réseau de bulles d'air.

Phase 3 - Étude de l'influence d'une matrice de béton à haute performance (Type XIII) sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat

La phase 3 a pour objectif d'étudier l'influence d'une matrice de béton à haute performance (Type XIII) sur la susceptibilité des gros granulats à l'éclatement et au dégarnissement. Elle comporte deux bétons fabriqués avec les deux sources granulaires (1 et 8) de la catégorie 3. Ces deux granulats de la catégorie inférieure ont été choisis afin de mieux mettre en évidence l'effet potentiellement favorable d'une matrice à haute performance sur la durabilité des particules de gros granulat.

Les bétons sont formulés selon les exigences pour le type XIII (MTQ) en utilisant 430 kg/m^3 de liant Gub-S/SF. Le calibre des gros granulats est 5 - 14 mm. Les dosages de l'AEA et du SP ont été ajustés pour obtenir 5 à 8 % d'air et un affaissement de 170 ± 30 mm. Une paire de plaques d'écaillage et sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués pour les essais d'écaillage, de résistance à la compression et pour la mesure des caractéristiques du réseau d'air. Le tableau 9.5 présente les principales caractéristiques des bétons de la phase 3.

Tableau 9.5 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 3

Type de liant	-	GUb-S/SF
f'c à 28 jours	MPa	50
Dosage en liant	kg/m^3	430
Eau/liant	-	0,36
Calibre du gros granulat	mm	5-14
Teneur en air	%	5 à 8
Affaissement	mm	170 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230
Type de superplastifiant	-	Polynaphtalène

Phase 4 - Étude de l'influence d'une matrice de béton de faible performance (Type F2) sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat

La phase 4 a pour objectif d'étudier l'influence d'une matrice à plus faible performance (classe F2 de la norme CSA A23.1) sur la susceptibilité des gros granulats à l'éclatement et au dégarnissement. Elle comporte deux bétons fabriqués avec les deux sources granulaires de la catégorie la moins performante (sources 1 et 8). Ces deux granulats ont été choisis pour mieux mettre en évidence l'effet potentiellement défavorable d'une matrice de plus faible durabilité à l'écaillage.

Les bétons sont formulés selon les critères de la classe d'exposition F2 de la norme CSA A23.1 en utilisant 300 kg/m^3 de liant de type GU. Les dosages en AEA et en SP ont été ajustés afin d'obtenir 4 à 7 % d'air et un affaissement de 80 ± 30 mm. Une paire de plaques d'écaillage et sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués pour les essais d'écaillage, de résistance à la compression et pour la mesure des caractéristiques du réseau d'air. Le Tableau 9.6 présente les caractéristiques des bétons de la phase 4.

Tableau 9.6 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 4

Type de liant	-	GU
f'c à 28 jours	MPa	25
Dosage en liant	kg/m^3	300
Eau/liant	-	0,55
Calibre du gros granulat	mm	5-20
Teneur en air	%	4 à 7
Affaissement	mm	80 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230
Type de réducteur d'eau	-	Lignosulfonate

Phase 5 - Étude de l'influence d'une variation des caractéristiques du réseau d'air sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement

La phase 5 a pour objectif d'étudier l'influence d'une variation du facteur d'espacement sur la susceptibilité à l'éclatement et au dégarnissement du gros granulat. Elle comporte deux bétons formulés avec une matrice de type V-S et avec la source granulaire 11 de la catégorie 2 (intermédiaire). Le dosage de l'AEA a été ajusté pour produire les facteurs d'espacement suivants : inférieur à 230 µm, compris entre 250 et 350 µm et supérieur à 350 µm. Il est à noter que le béton avec un facteur d'espacement inférieur à 230 µm provient de la phase 1 (matrice V-S, calibre 5 - 20 mm, source 11, facteur d'espacement de 96 µm) car il a été produit avec la même source granulaire (11) et la même matrice de béton (V-S). Les deux bétons de cette phase ont été produits avec 385 kg/m^3 de liant GUb-S/SF et un gros granulat de calibre 5 - 20 mm. Le dosage en SP a été ajusté pour obtenir un affaissement de 130 ± 30 mm. Une paire de plaques d'écaillage et sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués pour les essais d'écaillage, de résistance à la compression et pour la mesure des caractéristiques du réseau d'air. Le Tableau 9.7 présente les caractéristiques des bétons de la phase 5.

Tableau 9.7 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 5

Type de liant	-	GUb-S/SF
f'c à 28 jours	MPa	35
Dosage en liant	kg/m^3	385
Eau/liant	-	0,40
Calibre du gros granulat	mm	5-20
Teneur en air	%	-
Affaissement	mm	130 ± 30
$\bar{L}$	µm	<230 / 250-350 / >350
Type de superplastifiant	-	Polynaphtalène

Phase 6 - Étude de l'influence du géotextile en fond de moule sur la résistance à l'écaillage d'un béton de Type C2

La phase 6 a pour objectif d'évaluer l'influence du géotextile en fond de moule sur la durabilité à l'écaillage d'un béton formulé selon la classe C2 de la norme CSA A23.2. Elle comporte un béton dont le facteur d'espacement visé est inférieur à 230 µm et un béton dont le facteur d'espacement est compris entre 300 et 350 µm. Pour chaque béton deux paires de plaques d'écaillage sont produites : une paire avec un géotextile et une paire sans géotextile. Les bétons sont produits avec 400 kg/m^3 de liant GU et un gros granulat de calibre 5 - 20 mm. Le gros granulat provient de la source granulaire 18 qui est celui qui est couramment utilisé au laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke. Une paire de plaques d'écaillage et sept cylindres de 100 x 200 mm ont été fabriqués pour les essais d'écaillage, de résistance à la compression et pour la mesure des caractéristiques du réseau d'air. Le Tableau 9.8 présente les caractéristiques des bétons de la phase 6.

Tableau 9.8 - Caractéristiques de formulation des bétons de type v-s de la phase 6

Type de liant	-	GU
f'c à 28 jours	MPa	35
Dosage en liant	kg/m^3	400
Eau/liant	-	0,42
Calibre du gros granulat	mm	5-20
Teneur en air	%	5 à 8
Affaissement	mm	80 ± 30
$\bar{L}$	µm	< 230 / 300< >350
Type de réducteur d'eau	-	Lignosulfonate

La Figure 9.3 résume les principales variables testées dans le cadre des six phases expérimentales de cette étude.

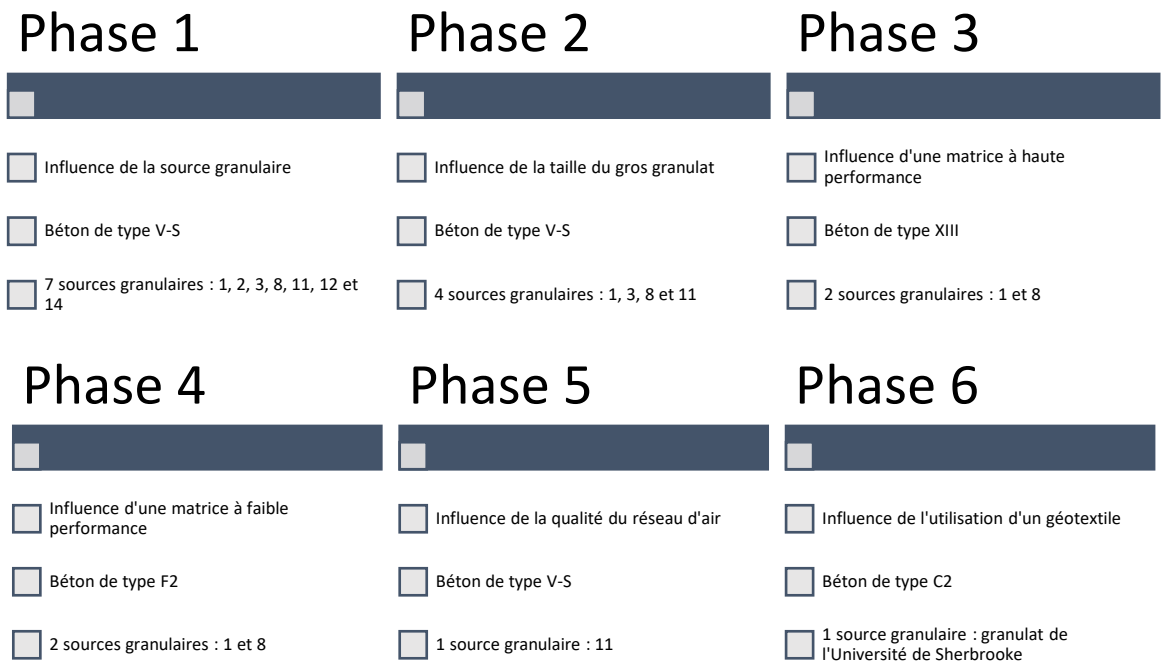


Figure 9.3 - Résumé du programme expérimental des six phases de cette partie de la recherche

9.3 ÉTUDE DE LA DURABILITE À L'ÉCAILLAGE DE BÉTONS DE TYPE V-S PRODUITS AVEC DES GROS GRANULATS DE CALIBRE 5-20 mm - PHASE 1

9.3.1 Analyse de la masse des débris

Le Tableau 9.9 présente les masses de débris obtenues après 56 cycles de gel-dégel pour les sept bétons de la phase 1. Chaque béton a été utilisé pour produire trois paires de plaques (gauche, milieu et droite) pour vérifier l'homogénéité des conditions de gel-dégel dans la chambre froide. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques et des photos illustrant l'aspect visuel de la surface des plaques à la fin des cycles de gel-dégel sont présentées à l'Annexe 3.

Les résultats du Tableau 9.9 montrent que seul le béton fabriqué avec le granulat de la source 3 respecte tout juste la limite maximale de 500 g/m^2 après 56 cycles. Tous les autres bétons de cette phase ont une masse de débris moyenne comprise entre 505 et 704 g/m^2. Malgré la présence d'un bon réseau de bulles d'air, ces bétons n'ont pas une durabilité à l'écaillage conforme à l'exigence de la norme BNQ 2621-905 Annexe B. Il faut noter que la durabilité à l'écaillage de ces bétons n'est pas « catastrophique ». Le dosage des constituants n'est probablement pas la cause de cette durabilité à l'écaillage non conforme car la formulation de type V-S est réputée durable à l'écaillage. Il est possible que le liant ternaire GUb-S/SF utilisé puisse être à l'origine de cet écaillage plus important. Une analyse plus approfondie sera faite au prochain chapitre 11.

Il faut noter que les masses de débris obtenues avec la plaque du milieu et la source 14 ne sont pas valides car des fuites de la solution ont été observées lors des cycles de gel-dégel. Ces valeurs n'ont pas été incluses dans le calcul des moyennes.

L'histogramme de la Figure 9.4 présente les masses de débris des sources granulaires en fonction de la localisation dans la chambre de gel-dégel. Les valeurs les plus élevées ont été obtenues avec les granulats des sources 1, 8 et 11. Ces trois granulats possèdent les plus fortes pertes au gel-dégel non confiné. Les plaques produites avec sources 8 et 11 localisées à droite de la chambre montrent un grand écart par rapport à la moyenne.

Globalement, il n'est pas possible de conclure sur un éventuel effet de la localisation dans la chambre sur la masse de débris. En effet, les masses de débris varient en fonction de la localisation, mais il n'est donc pas possible de dégager une tendance nette sur l'effet de la localisation sur l'intensité de l'écaillage. Ces résultats suggèrent que la chambre de gel-dégel produit des cycles thermiques qui ne dépendent pas de la localisation des plaques dans l'enceinte climatique (ce qui démontre une grande homogénéité des cycles). Une analyse plus détaillée de ces résultats sera effectuée au chapitre 11.

Tableau 9.9 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 1

Source de granulat	Catégorie de granulats	Emplacement dans l'enceinte de gel-dégel	Perte massique à 56 cycles (g/m^2)			
			Maxima	Minima	Moyenne emplacement	Moyenne béton
1	3	Gauche	674	603	639	647
		Milieu	688	541	615	
		Droite	752	626	689	
8	3	Gauche	611	603	607	704
		Milieu	692	576	634	
		Droite	915	826	871	
3	2	Gauche	406	397	402	435
		Milieu	548	455	502	
		Droite	461	345	403	
11	2	Gauche	617	601	609	664
		Milieu	657	572	615	
		Droite	878	661	770	
14	2	Gauche	514	502	508	505
		Milieu	291*	96*	194*	
		Droite	512	490	501	
2	1	Gauche	589	433	511	511
		Milieu	608	535	572	
		Droite	467	431	449	
12	1	Gauche	545	465	505	505
		Milieu	572	494	533	
		Droite	517	434	476	

* mesures non valides en raison de la fuite de la solution

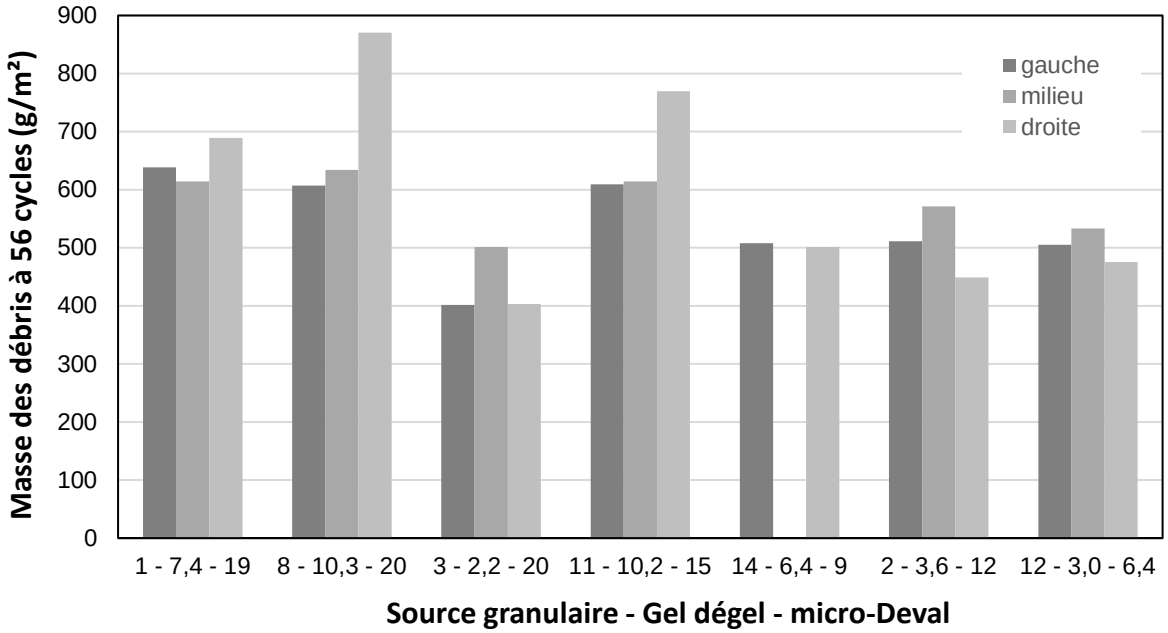


Figure 9.4 - Résultats moyens des débris massiques à 56 cycles en fonction de la source granulaire et de l'emplacement dans la chambre froide

9.3.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements

Les Figures 9.5 et 9.6 présentent les résultats des mesures de surface d'éclatement et de dégarnissement des bétons de la phase 1 après 56 cycles de gel-dégel. Les surfaces d'éclatement et de dégarnissement sont exprimées en pourcentage de la surface totale exposée. Chaque résultat est la moyenne des six plaques d'écaillage produites pour chaque source granulaire. Les barres verticales indiquent les valeurs minimales et maximales obtenues à partir de ces six plaques. Les courbes détaillées de l'évolution des dégarnissements et éclatements sont regroupées à l'Annexe 4

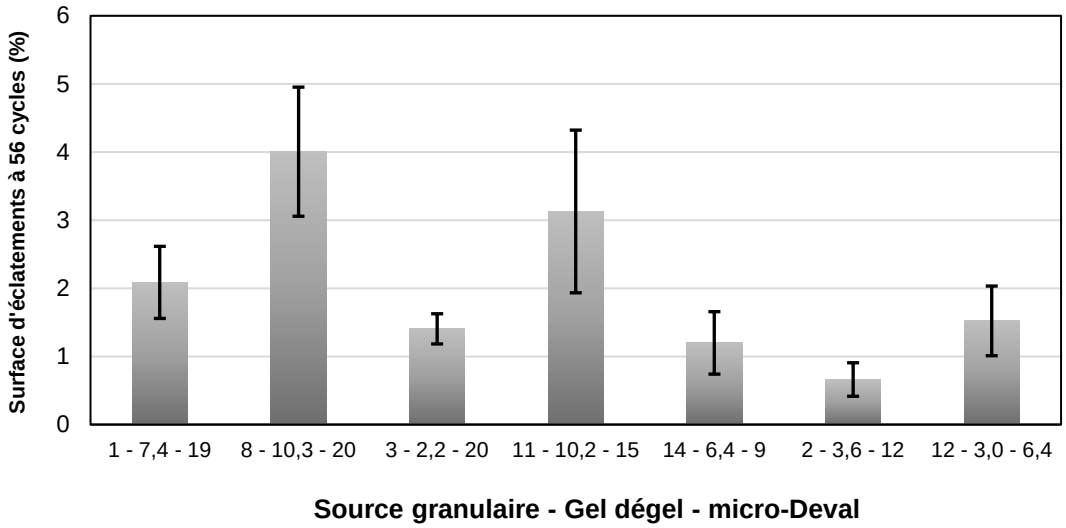


Figure 9.5 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 1

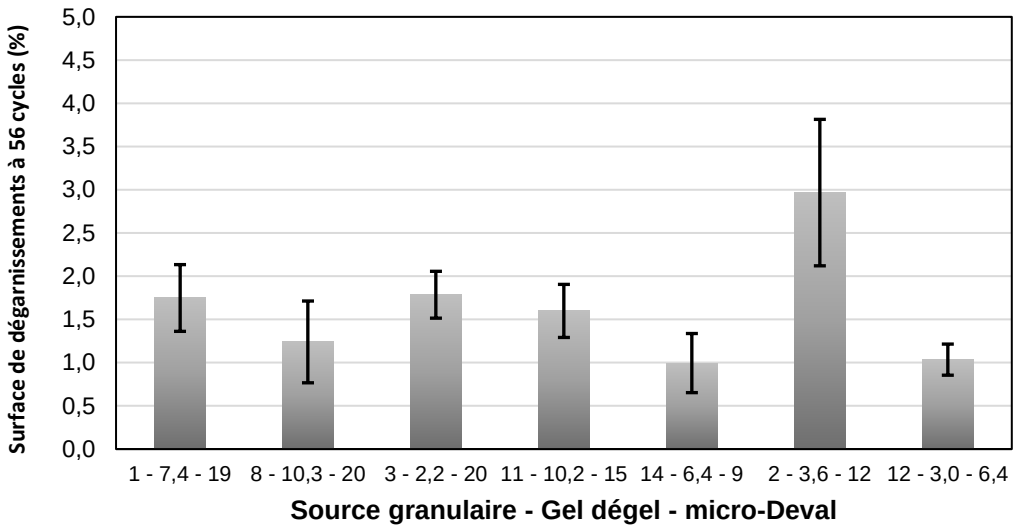


Figure 9.6 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 1

Les résultats de la Figure 9.5 montrent que la surface moyenne d'éclatements des granulats est comprise entre 0,7 % (source 2) et 4 % (source 8). Les plaques associées aux sources 1, 8 et 11 présentent les surfaces éclatées les plus élevées. Ce sont aussi les sources qui possèdent les plus fortes pertes au gel-dégel (supérieures à 7,1 %). L'analyse détaillée de ces résultats sera effectuée au chapitre 11.

Les résultats de la Figure 9.6 montrent que la surface moyenne dégarnie des plaques associées aux différentes sources granulaires testées est comprise entre 1,0 et 3 %. À l'exception de la source 2, les valeurs les plus élevées de dégarnissement (supérieure à 1,2 %) sont obtenues pour les granulats ayant une perte micro-Deval de 15 % ou plus. La source 2 semble être un cas particulier qui sera discuté plus en détail au chapitre 11.

Les courbes des Figures 9.7 à 9.9 présentent l'évolution typique des surfaces éclatées et dégarnies tout au long des cycles de gel-dégel des essais d'écaillage (sources 12, 3 et 8). En général, la progression est régulière tout au long de l'essai. Pour les sources 12 et 3 (Figures 9.7 et 9.8), l'évolution des dégarnissements et des éclatements se produit approximativement selon la même cinétique. Ce comportement est typique des autres sources. Cependant, des cinétiques différentes peuvent survenir (lorsque nous observons les courbes détaillées présentes à l'annexe 4). C'est notamment le cas de la source 8 (Figure 9.9). Durant les 35 premiers cycles, les dégarnissements et les éclatements progressent de la même manière. À partir de 35 cycles, les dégarnissements commencent à diminuer alors que les éclatements progressent plus rapidement. Ce phénomène découle du fait que des dégarnissements se transforment en éclatements. Des particules dégarnies sont probablement plus fortement exposées aux sels de déglaçage et à la saturation. Elles sont donc plus susceptibles d'être dégradées par le processus d'éclatement.

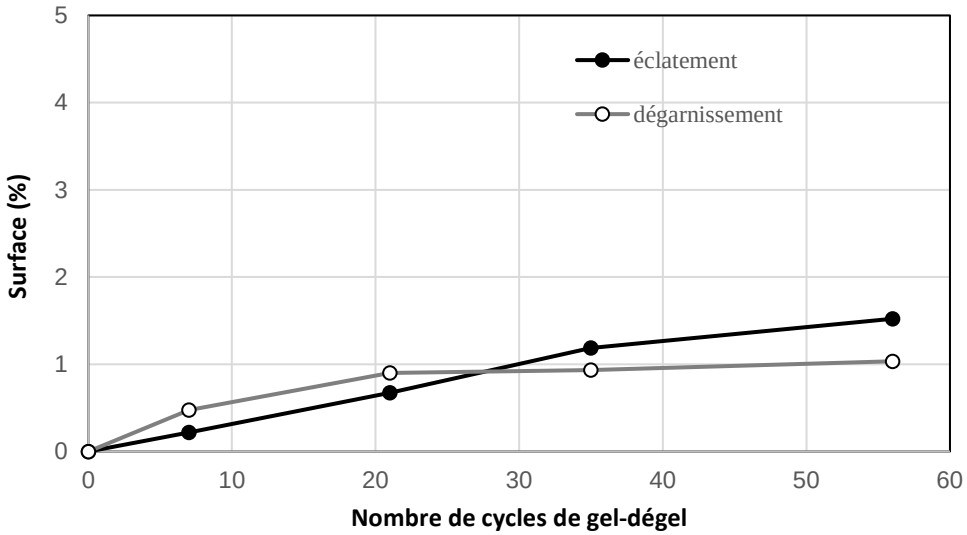


Figure 9.7 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulat de la source 12 (catégorie 1)

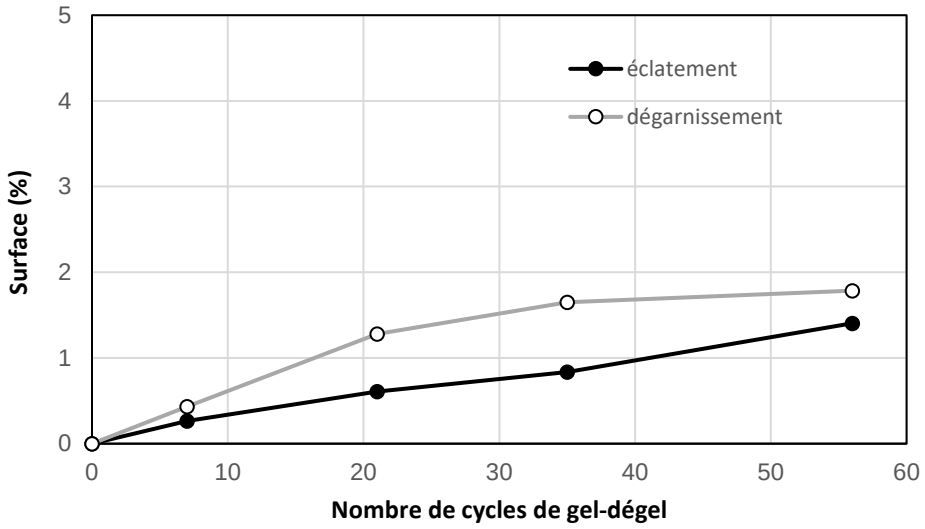


Figure 9.8 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulat de la source 3 (catégorie 2)

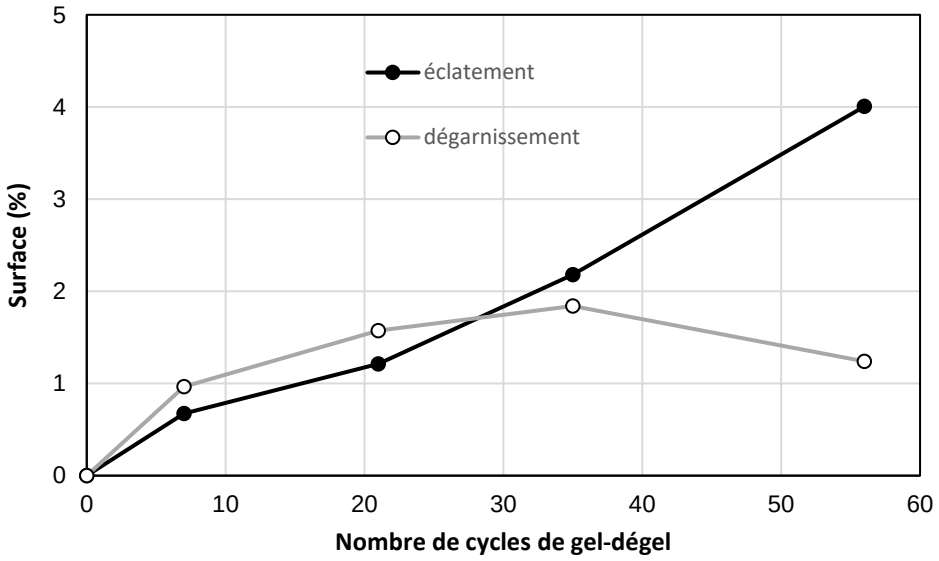


Figure 9.9 - Évolution des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction du nombre de cycles de gel-dégel des plaques comportant le granulat de la source 8 (catégorie 3)

9.4 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA DIMENSION MAXIMALE DU GROS GRANULAT SUR LA DURABILITE A L'ECAILLAGE DU BETON ET DU GROS GRANULAT - PHASE 2

9.4.1 Analyse de la masse des débris

Le Tableau 9.10 présente les masses de débris obtenues après 56 cycles de gel-dégel pour les quatre bétons de la phase 2 qui sont fabriqués avec un gros granulat de calibre 5 - 14 mm. Chaque béton a été utilisé pour produire une paire de plaques placées à gauche de la chambre froide. Ce tableau présente les masses de débris en g/m^2. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques et l'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude sont présentées à l'Annexe 5.

Comme dans le cas des bétons de la phase 1, la plupart des bétons de la phase 2 montrent une masse des débris supérieure à 500 g/m^2. Seul le béton fabriqué avec le granulat de la source 1, avec 375 g/m^2, satisfait l'exigence maximale de 500 g/m^2. Les bétons de la phase 2 sont fabriqués avec le même liant ternaire GUb-S/SF utilisé pour la phase 1. Globalement, ces résultats indiquent que la diminution de la taille maximale du gros granulat de 20 à 14 mm n'engendre pas de changement notable de la masse des débris après 56 cycles. Ces résultats feront l'objet d'une analyse plus complète au chapitre 11.

Tableau 9.10 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 2

Source de granulat	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [g/m^2]		
		Maxima	Minima	Moyenne
1	Gauche	413	381	397
3	Gauche	562	545	554
8	Gauche	725	649	687
11	Gauche	623	506	565

9.4.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements

Les Figures 9.10 et 9.11 présentent les pourcentages moyens des surfaces d'éclatement et de dégarnissement après 56 cycles. Les plaques correspondant aux sources 1 et 8, de la catégorie inférieure, présentent les plus grandes surfaces éclatées (supérieures à 2,8 %). Les plaques correspondant à la source 11, de catégorie intermédiaire, montrent aussi une surface d'éclatement élevée de 2,9 %. Ces trois résultats élevés ont été obtenus avec des sources granulaires caractérisées par une perte à l'essai de gel-dégel non confiné supérieure à 7 %. La source 3 (catégorie intermédiaire) montre la plus faible surface de dégarnissement. C'est aussi celle qui possède une des plus faibles pertes au gel-dégel non confiné (2,2 %). Une première analyse de ces résultats indique que l'utilisation d'un gros granulat de calibre 5 - 14 mm produit des surfaces d'éclatement très similaires à celles des bétons de la phase 1 produits avec des gros granulats de calibre 5 - 20 mm.

La Figure 9.11 présente les surfaces moyennes de dégarnissement après 56 cycles de gel-dégel. À l'exception de la source 3, les surfaces dégarnies sont relativement faibles (inférieure à 1,0 %). En comparant ces résultats à ceux présentés à la Figure 9.5 (phase 1), il semble qu'une diminution de la taille du gros granulat pourrait contribuer à diminuer la susceptibilité du granulat face au dégarnissement. Une analyse plus détaillée de ces résultats sera réalisée au chapitre 11.

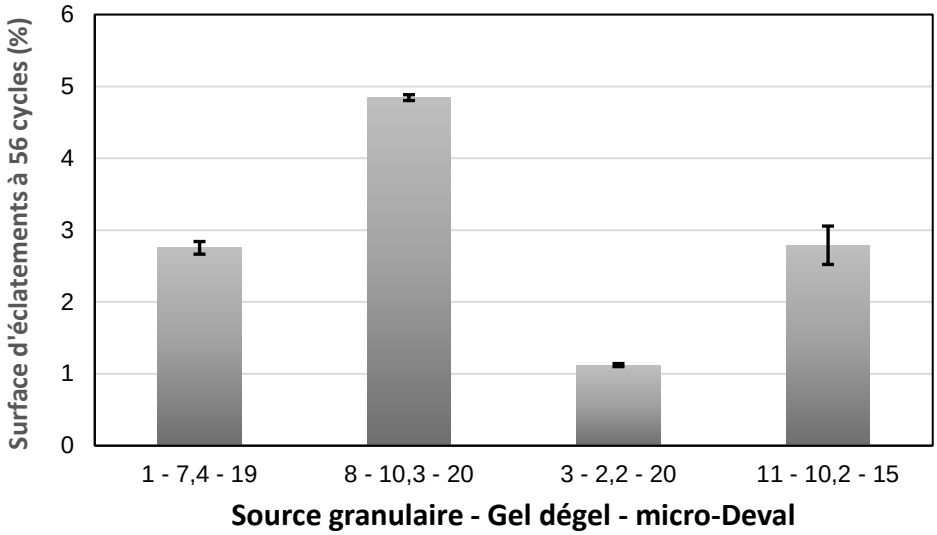


Figure 9.10 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 2

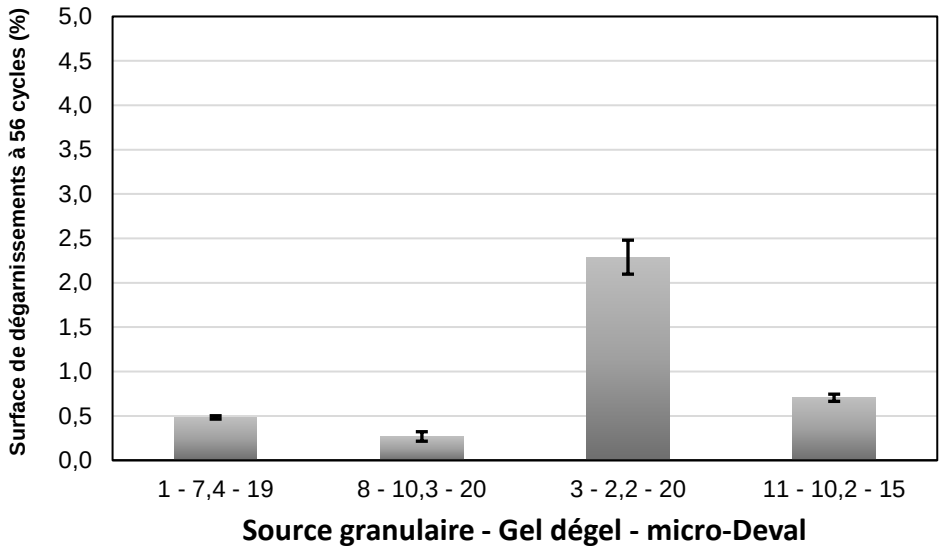


Figure 9.11 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 2

9.5 ÉTUDE DE L'INFLUENCE D'UNE MATRICE DE BETON A HAUTE PERFORMANCE (TYPE XIII) SUR LA SUSCEPTIBILITE A L'ECLATEMENT ET AU DEGARNISSEMENT DU GROS GRANULAT - PHASE 3

9.5.1 Analyse de la masse des débris

Le Tableau 9.11 présente les masses de débris (en g/m^2) des bétons de la phase 3 obtenues après 56 cycles de gel-dégel. Chaque béton a été utilisé pour produire une paire de plaques placées à gauche de la chambre froide. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques et l'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude sont présentées à l'Annexe 7.

Les résultats du Tableau 9.11 montrent que la masse de débris des bétons de type XIII produits avec les deux sources granulaires de la catégorie inférieure (1 et 8) respecte largement l'exigence maximale de 500 g/m^2. Cette bonne durabilité à l'écaillage était prévisible car la matrice à haute performance de type XIII possède un potentiel de durabilité supérieur à celui de la matrice V-S utilisé pour les phases 1 et 2.

Tableau 9.11 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 3

Source de granulat	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [g/m^2]		
		Maxima	Minima	Moyenne
1	Gauche	361	207	284
8	Gauche	350	305	328

9.5.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements

Les Figures 9.12 et 9.13 présentent les pourcentages moyens de surface d'éclatement et de dégarnissement des plaques d'écaillage de la phase 3 après 56 cycles de gel-dégel. Les surfaces éclatées obtenues pour les granulats provenant des sources 1 et 8 et impliquant une matrice à haute performance (Figure 9.12) sont très similaires aux surfaces éclatées obtenues avec les mêmes sources mais dans une matrice de type V-S (Figure 9.5). Cependant, les surfaces dégarnies sont nettement plus faibles dans le cas de la matrice à haute performance (Figure 9.13). Une matrice de type XIII semble donc avoir un effet nettement favorable en réduisant les dégarnissements des sources granulaires de la catégorie inférieure. L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 11. Les courbes détaillées de l'évolution des éclatements et des dégarnissements en fonction du nombre de cycles sont présentées à l'Annexe 8

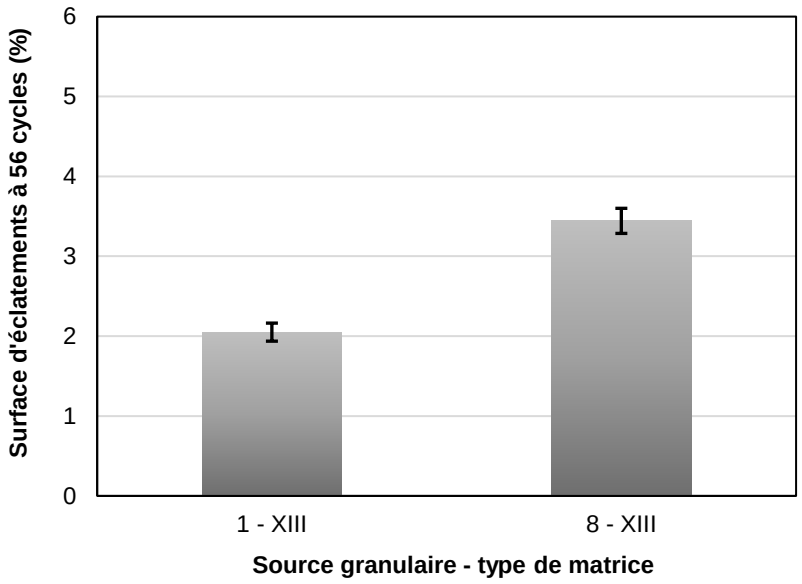


Figure 9.12 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 3

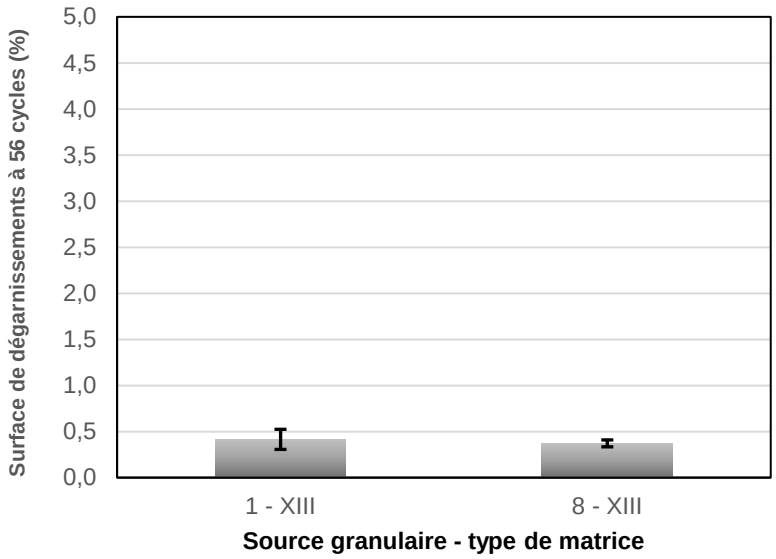


Figure 9.13 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 3

9.6 ÉTUDE DE L'INFLUENCE D'UNE MATRICE DE BÉTON DE FAIBLE PERFORMANCE (TYPE F2) SUR LA SUSCEPTIBILITÉ À L'ÉCLATEMENT ET AU DÉGARNISSEMENT DU GROS GRANULAT - PHASE 4

9.6.1 Analyse de la masse des débris

Le Tableau 9.12 présente les masses de débris (g/m^2) des bétons de la phase 4 obtenues après 56 cycles de gel-dégel. Chaque béton a été utilisé pour produire une paire de plaques placées à gauche de la chambre froide. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques et l'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude sont présentées à l'Annexe 9.

Les masses de débris obtenues avec les plaques associées à la source 1 ne sont pas valides en raison de la fuite de la solution lors des cycles de gel-dégel. Ces fuites n'ont pas pu être détectées ni corrigées car elles se sont produites durant la période de confinement de la COVID-19. Durant cette période, les laboratoires n'étaient alors pratiquement pas accessibles par le personnel technique.

La masse de débris obtenue avec les plaques associées à la source 8 dépasse très nettement l'exigence maximale de 500 g/m^2. Ce résultat était prévisible compte tenu de la faible durabilité à l'écaillage d'une matrice de type F2. Ce type de matrice ne doit pas être utilisé dans le cas d'une exposition à des cycles de gel-dégel en présence de sels de déglaçage.

Tableau 9.12 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 4

Source de granulat	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [g/m^2]		
		Maxima	Minima	Moyenne
1	Gauche	251*	228*	240*
8	Gauche	1346	1085	1216

* Valeurs non valides en raison de la fuite de la solution lors de l'essai d'écaillage

9.6.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements

Les Figures 9.14 et 9.15 présentent les pourcentages moyens de surfaces d'éclatement et de dégarnissement des plaques d'écaillage de la phase 4 après 56 cycles de gel-dégel. Les surfaces éclatées et dégarnies de la source 1 ne sont pas indiquées car les mesures en laboratoire sont invalides en raison de la fuite de la solution lors de l'essai d'écaillage. Les surface éclatées et dégarnies obtenues avec les plaques associées à la source 8 sont très élevées (supérieures à 4 %). Ces résultats suggèrent qu'une matrice de faible performance (classe d'exposition F2) offre une moins bonne protection contre l'endommagement par éclatement et dégarnissement qu'une matrice de type V-S ou une matrice de type XIII. L'analyse détaillée de ces résultats sera effectuée au chapitre 11. Les courbes détaillées de l'évolution des éclatements et dégarnissements en fonction du nombre de cycles de gel-dégel sont présentées à l'Annexe 10.

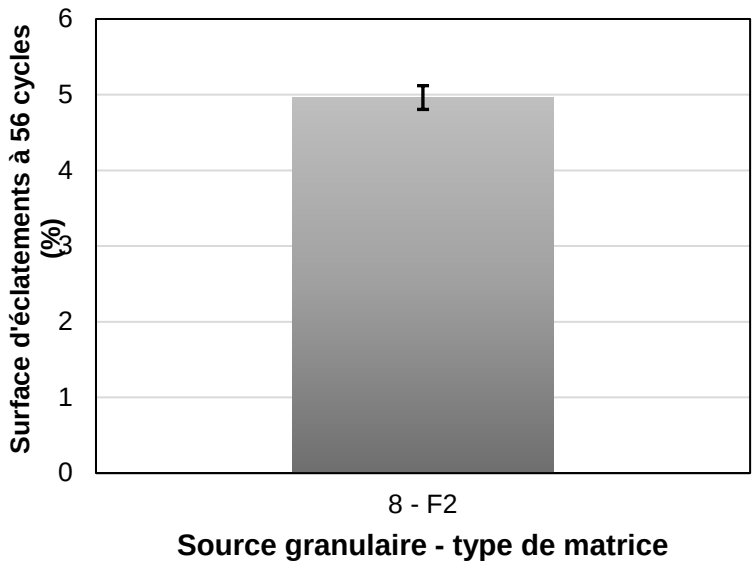


Figure 9.14 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 4

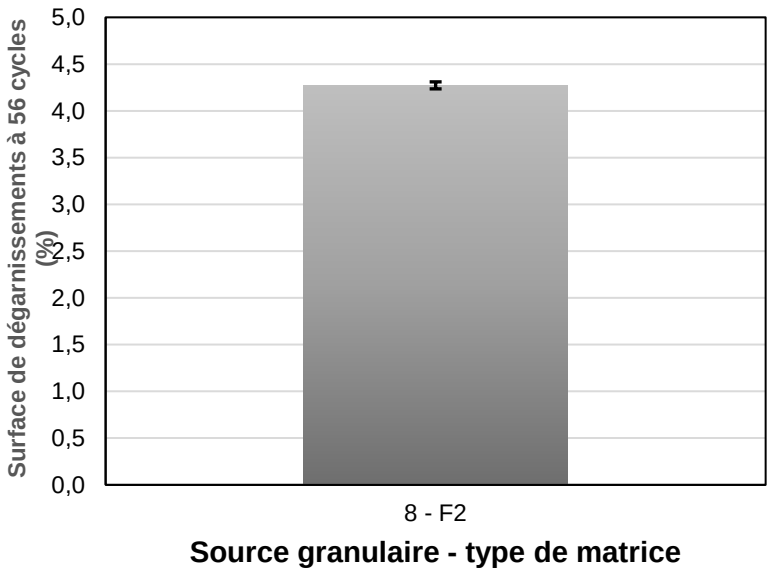


Figure 9.15 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 4

9.7 ÉTUDE DE L'INFLUENCE D'UNE VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU D'AIR SUR LA SUSCEPTIBILITÉ À L'ÉCLATEMENT ET AU DÉGARNISSEMENT - PHASE 5

9.7.1 Analyse de la masse des débris

Le Tableau 9.13 présente les masses de débris (g/m^2) obtenues après 51 cycles de gel-dégel pour les deux bétons de la phase 5. Suite à un arrêt imprévu de la chambre froide (dû à des sondes de température défectueuses), il a été décidé d'interrompre définitivement les cycles car le délai requis pour obtenir de nouvelles sondes était trop long. Il est considéré que les 5 cycles non effectués n'ont pas d'effet significatif sur les résultats et sur les conclusions tirées de ceux-ci puisque les résultats obtenus étaient déjà supérieurs à la limite suggérée de 500 g/m^2. Chaque béton a été utilisé pour produire une paire de plaques placées à gauche de la chambre froide. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques et l'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude sont présentées à l'Annexe 12.

Les valeurs de $\overline{L}$ obtenues sont inférieures aux valeurs visées. Le premier béton visait un $\overline{L}$ supérieur à 350 µm alors que le $\overline{L}$ réel est de 224 µm. C'est également le cas pour le second béton pour lequel un $\overline{L}$ entre 250 et 350 µm était visé. Un $\overline{L}$ de 173 µm a ainsi été obtenu. Il est très difficile de prévoir le $\overline{L}$ à partir du seul dosage de l'AEA. Les dosages en AEA ont pourtant été choisis pour espérer des $\overline{L}$ dans les plages visées selon les travaux de P.O. Morin-Morisette [19]. Malheureusement, cela n'a pas été possible, probablement en raison de la très grande efficacité de l'AEA utilisé pour ce projet qui diffère de celui de P.O. Morin-Morisette.

Les résultats du Tableau 9.13 montrent que les masses de débris des deux bétons de cette phase sont supérieures à l'exigence maximale de 500 g/m^2. C'est aussi le cas de la quasi- totalité des autres bétons de type V-S fabriqués avec le liant ternaire GUb-S/SF (phase 1 et 2). Cependant, pour cette phase, les masses de débris de 800 et 872 g/m^2 obtenues après 51 cycles sont supérieures à la masse de débris de 664 g/m^2 obtenues avec les plaques associées à la source 11 et testées dans le cadre de la phase 1.

Tableau 9.13 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 5

Source granulaire - $\bar{L}$	Emplacement	Perte massique à 51 cycles [g/m^2]		
		Maxima	Minima	Moyenne
11 - 224 µm	Gauche	1002	742	872
11 - 173 µm	Gauche	893	707	800

9.7.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements

Les Figures 9.16 et 9.17 présentent les pourcentages moyens de surfaces d'éclatement et de dégarnissement des plaques d'écaillage de la phase 5 après 51 cycles de gel-dégel. Cette figure inclut aussi les résultats (après 56 cycles de gel-dégel) obtenus avec les plaques associées à la source 11 dans le cadre de la phase 1 ($\bar{L}$ = 96 µm). Ainsi, il n'y a aucun facteur d'espacement supérieur à 230 µm, exigence de la norme CSA A23.1 [17].

Les résultats des Figures 9.16 et 9.17 suggèrent que le facteur d'espacement de la matrice de béton a peu d'influence sur l'intensité des surfaces éclatées ou dégarnies des bétons fabriqués avec la source granulaire 11, du moins lorsque le facteur d'espacement est inférieur à la valeur critique de 230 µm. Néanmoins, les valeurs de débris massiques inférieures avec un facteur d'espacement plus élevé peuvent être dû aux 5 cycles de gel-dégel manquant.

L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 11. Les courbes détaillées de l'évolution des éclatements et des dégarnissements en fonction du nombre de cycles de gel-dégels sont présentés à l'Annexe 12.

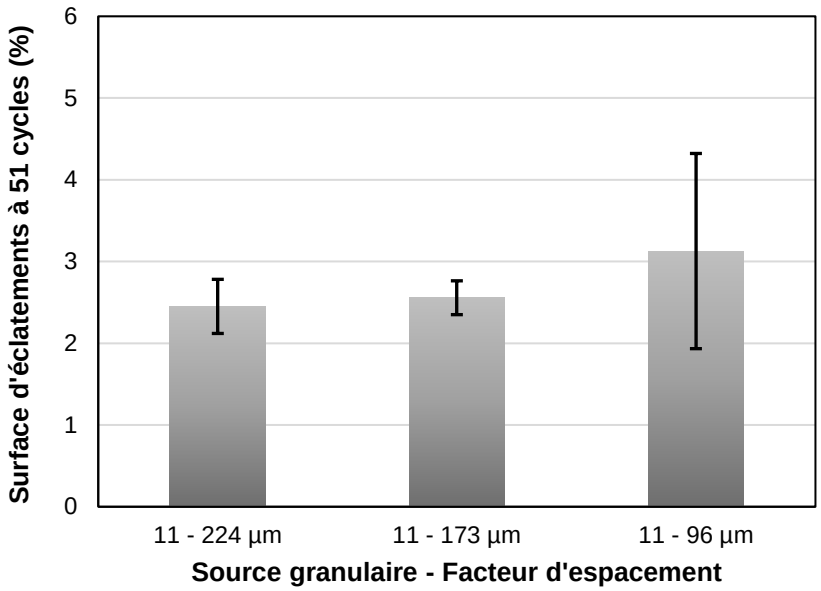


Figure 9.16 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 5

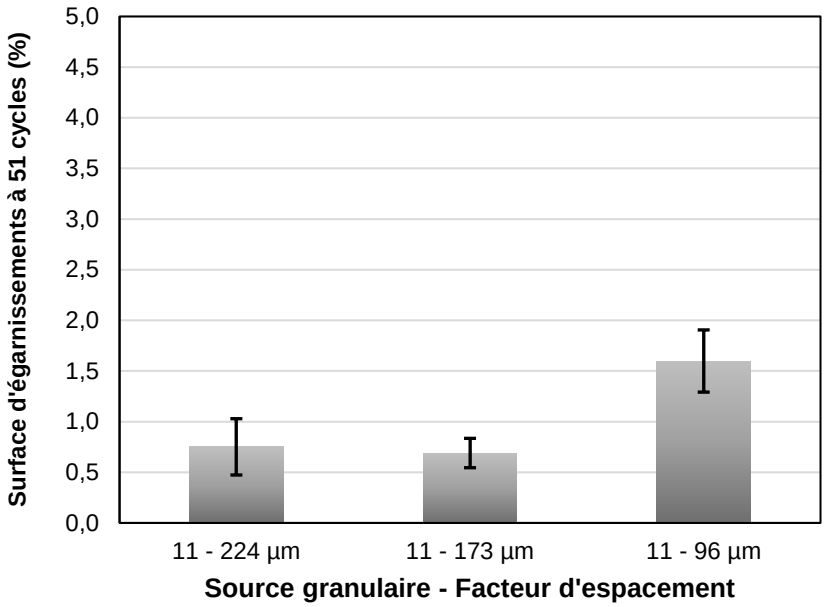


Figure 9.17 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 5

9.8 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU GÉOTEXTILE EN FOND DE MOULE SUR LA RÉSISTANCE À L'ÉCAILLAGE D'UN BÉTON DE TYPE C2 - PHASE 6

9.8.1 Analyse de la masse des débris

Le Tableau 9.14 présente les masses de débris (g/m^2) obtenues après 56 cycles de gel-dégel pour les quatre conditions d'essai de la phase 6. Chaque béton a été utilisé pour produire deux paires de plaques placées à gauche de la chambre froide. Une paire de plaques a été produite selon la norme BNQ 2621-905 Annexe B (géotextile déposé au fond du moule et retiré avant la mise en chambre froide), l'autre paire fabriquée en même temps avec le même béton ne comporte pas de géotextile. Les courbes détaillées de l'évolution des débris massiques et l'aspect visuel des plaques à la fin de l'étude sont présentées à l'Annexe 13.

Le Tableau 9.14 montre que les masses de débris obtenues avec les autres conditions d'essais de cette phase sont largement inférieures à la limite de 500 g/m^2. Il faut rappeler que tous ces bétons ont été fabriqués avec un ciment GU. Ces résultats suggèrent que le ciment GU semble plus durable à l'écaillage que le liant ternaire GUb-S/SF utilisé pour les phases 1, 2, 3 et 5.

Tableau 9.14 - Masse de débris après 56 cycles de gel- dégel des bétons de la phase 6

$\bar{L}$ - Géotextile	Emplacement	Perte massique à 56 cycles [g/m^2]		
		Maxima	Minima	Moyenne
156 µm	Gauche	190	162	176
156 µm - GTX	Gauche	88	87	88
191 µm	Gauche	224	199	212
191 µm - GTX	Gauche	330	327	329

9.8.2 Analyse des éclatements et des dégarnissements

Les Figures 9.18 et 9.19 présentent les pourcentages moyens de surface d'éclatement et de dégarnissement des plaques d'écaillage de la phase 6 après 56 cycles de gel-dégel. Les résultats des Figures 9.18 et 9.19 montrent clairement que la présence ou l'absence d'un géotextile en fond de moule n'a aucun effet sur l'intensité des surfaces éclatées ou dégarnies dans le cas du béton de type C2 fabriqué avec un liant de type GU et un gros granulat dont la durabilité est démontrée, soit le granulat de l'Université de Sherbrooke qui est la source granulaire 18. L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 11. Les courbes détaillées de l'évolution des éclatements et des dégarnissements en fonction du nombre de cycles de gel-dégel sont présentées à l'Annexe 14.

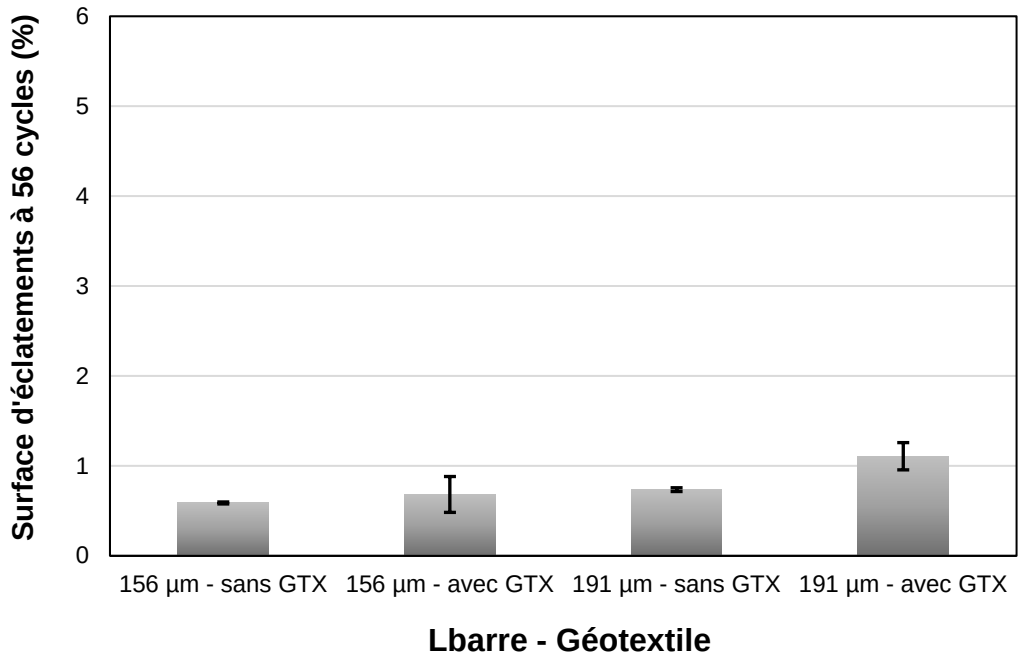


Figure 9.18 - Surface d'éclatement des bétons de la phase 6

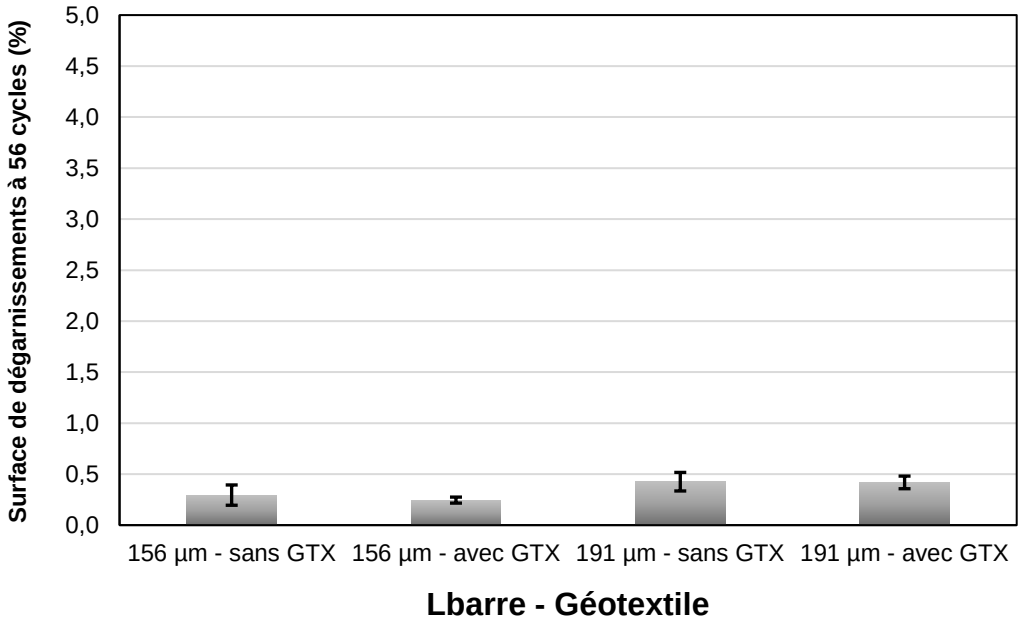


Figure 9.19 - Surface de dégarnissement des bétons de la phase 6

10 TESTS D'ÉCAILLAGE INTERLABORATOIRE

10.1 RÉALISATION ET CONDITIONNEMENT DES BÉTONS

10.1.1 Formulation et propriétés générales des bétons

La formulation du béton de Type V-S, réalisé le 14 juillet 2020, est donnée dans le Tableau 10.1. La résistance à la compression de 35 MPa a bien été atteinte à 28 jours, respectant cette exigence pour les bétons V-S.

Tableau 10.1 - Formulation et propriétés du béton durci pour l'échange interlaboratoires

Dosage des constituants		
Rapport E/L		0,39
Liant GUb S/SF	[kg/m³]	390
Eau	[kg/m³]	152
Granulat 20 mm source #18	[kg/m³]	966
Sable	[kg/m³]	773
Superplastifiant	[kg/m³]	5,5
AEA	[ml/100 kg de liant]	150
Réducteur d'eau	[ml/100 kg de liant]	180
Retardateur de prise	[ml/100 kg de liant]	50
Caractéristiques du béton durci		
Facteur d'espacement	[mm]	161
Surface spécifique	[1/mm]	28,5
Volume d'air à l'état durci	[%]	6,2
Résistance à la compression		
7 jours	[MPa]	38,6
28 jours	[MPa]	47,3

Les propriétés du béton à l'état frais sont données dans le Tableau 10.2 au début et à la fin de la réalisation des 12 plaques d'écaillage. Les exigences d'affaissement (100-160 mm) et de volume d'air (5-8 %) du béton V-S ont été respectées durant la confection des 12 plaques d'écaillage.

Tableau 10.2 - Propriétés à l'état frais du béton de type V-S

Propriétés	Exigences	Début de la réalisation des plaques d'écaillage	Fin de la réalisation des plaques d'écaillage
Temps écoulé depuis le contact eau-ciment (min)	-	40	61
Affaissement (mm)	100-160 mm	160	100
Masse volumique (kg/m^3)	-	2 320	2 335
Volume d'air (%)	5-8 %	5,9	6,1
Température (^{o}C)	-	24,6	24,5

10.1.2 Confection et conditionnement des plaques d'écaillage

À l'Université de Sherbrooke, un seul intervenant, soit Nicolas Le Piquet, a fabriqué 12 plaques d'écaillage selon la norme BNQ 2621-905/2018. Chacun des 6 laboratoires impliqués dans cet échange interlaboratoires de 2020 a reçu une paire de plaques d'écaillage qui a été livrée par un technicien de l'UdeS. Le conditionnement détaillé des plaques d'écaillage est donné dans le Tableau 10.3 pour les 6 laboratoires impliqués. La cure humide de 14 jours a été réalisée intégralement à l'UdeS. Les plaques d'écaillage ont été livrées aux différents laboratoires le 29 juillet, soit dans leur première journée de séchage. Chacun des laboratoires a réalisé dans ses installations le restant du conditionnement ainsi que les essais d'écaillage conformément à la norme BNQ 2621-905/2018 à l'exception du Laboratoire 5 qui a réalisé une présaturation de 14 jours au lieu de 7 jours.

Tableau 10.3 - Conditionnement des plaques d'écaillage

Étape	Durée (j)	Lieu
Cure humide	14	UdeS
Séchage	14	UdeS (1 jour) Labos #1 à 6 (13 jours)
Présaturation	7 (labos 1, 2, 3, 4, 6) 14 (labo 5)	Labos #1 à 6
Cycles journaliers de gel/dégel	56	Labos #1 à 6

10.2 CARACTÉRISTIQUES DES CHAMBRES D'ÉCAILLAGE ET DES CYCLES DE GEL-DÉGEL

10.2.1 Données récoltées en 2020 dans le cadre de cette étude

La Figure 10.1, extraite de la norme BNQ 2621-905/2018, présente les cycles de température admissibles pour une chambre d'écaillage.

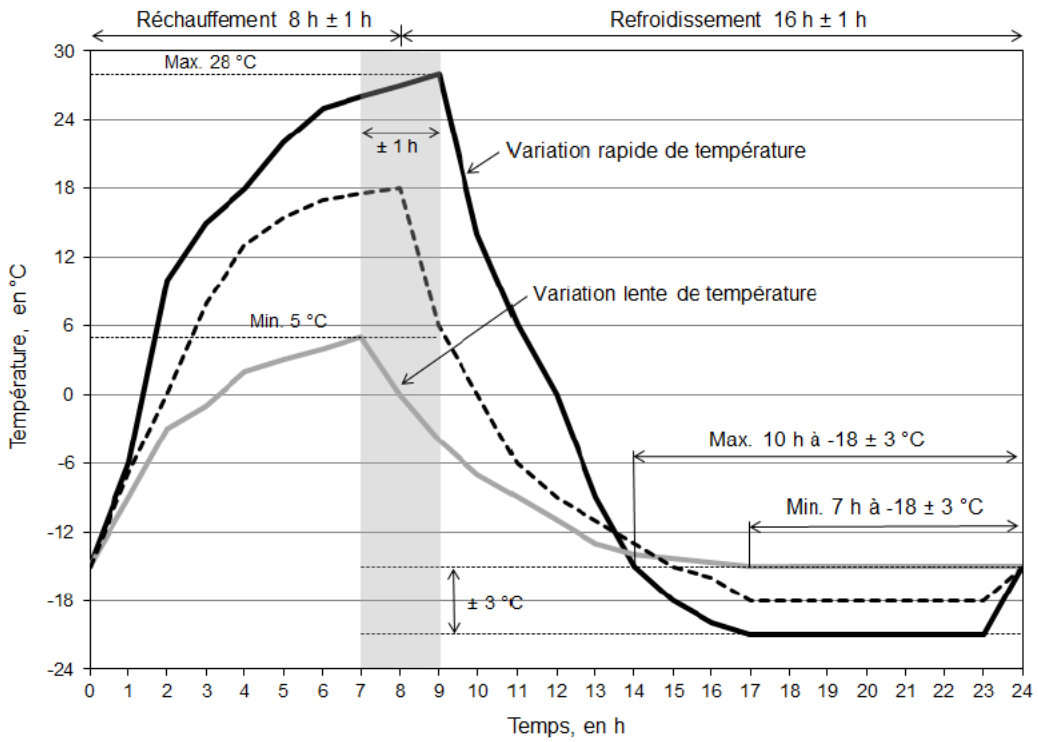


Figure 10.1 - Cycles de température admissibles pour une chambre d'écaillage

En fonction des exigences incluses dans la Figure 10.2, le Tableau 10.4 donne les caractéristiques des six chambres d'écaillage utilisées dans le cadre de l'échange interlaboratoires de 2020.

Tableau 10.4 - Caractéristiques des chambres d'écaillage - Informations de 2020

Caractéristiques		Norme BNQ	Laboratoire					
			1	2	3	4	5	6
Prise de température	Interface béton / solution saline	x	x	x	x	x	x	
	Dans l'air							x
Durée du refroidissement (h)		16 ± 1	16,3	14,8	16	17	16	13,2
Durée du chauffage (h)		8 ± 1	7,7	9,2	8	7	8	10,8
Température minimale (°C)		-18 ± 3	-18,7	-17	-17,6	-18	-17	-18
Durée à -18 ± 3 °C (h)		Entre 7 et 10	8,1	7,75	7	8	7	10,9
Température maximale (°C)		Entre 5 et 28	16	17,5	22,9	15	16	25
Vitesse de gel max. (°C/h)		-	-3,6	-4	-5,5	-7,2	-4,7	-16,6

Au niveau des variations de température à l'interface du béton et de la solution saline, les chambres d'écaillage des Laboratoires 1, 3, 4 et 5 respectent toutes les exigences de la norme BNQ 2621-905/2018. La chambre du Laboratoire 2 présente une durée de refroidissement très légèrement inférieure de 0,2 h, soit 12 minutes, par rapport à l'exigence de 16 ± 1 h, le restant des caractéristiques de cette chambre étant

conformes à la norme. Comme la température de la chambre du Laboratoire 6 est prise dans l'air et non pas à l'interface à l'interface du béton et de la solution saline, les variations de température enregistrées ne peuvent être comparées à celles de la norme.

10.2.2 Données complémentaires de 2019 recueillies par le MTQ

Le Tableau 10.5 présente les caractéristiques principales des chambres environnementales recueillies par le MTQ en 2019 [Rapport de visites de chambres d'écaillage du béton]. Les 6 laboratoires impliqués dans l'échange interlaboratoires ont participé à cette collecte de données. Les chambres 4 et 5 ont les vitesses moyennes de vents les plus élevées. Les chambres 3 et 6 ont les vitesses moyennes de vents les plus faibles. La chambre 1 possède des vitesses intermédiaires.

Tableau 10.5 - Caractéristiques des chambres d'écaillage - Informations du MTQ de 2019

Caractéristiques des chambres		Laboratoire					
		1	2	3	4	5	6
Vitesse des vents dans les coins (m/s)	Maximum	0,58	n/d*	0,30	0,83	0,95	0,15
	Moyenne	0,46	n/d*	0,18	0,60	0,62	0,08
Vitesses des vents au centre (m/s)	Maximum	0,73	n/d*	1,04	1,01	1,70	0,58
	Moyenne	0,65	n/d*	0,39	0,88	1,41	0,50

* informations non disponibles dans le rapport du MTQ

10.3 ESSAIS D'ÉCAILLAGE

10.3.1 Résultats expérimentaux de 2020

Les résultats finaux des essais de résistance à l'écaillage réalisés par les six laboratoires sont présentés dans le Tableau 10.6 et illustrés dans la Figure 10.2. Les résultats détaillés sont présentés à l'Annexe 15. Comme le Laboratoire 5 a effectué une présaturation des plaques d'écaillage non conforme à la norme BNQ 2621-905/2018, les données sont présentées avec et sans ce laboratoire. Au niveau des résidus massiques moyens de deux plaques, ils varient entre 410 et 1 335 kg/m^2 avec les six laboratoires et entre 410 et 970 kg/m^2 sans le Laboratoire 5. Pour deux laboratoires, identifiés 1 et 4, le résidu massique moyen est inférieur à l'exigence de 500 kg/m^2 sachant que dans les deux cas une plaque sur deux présente une valeur supérieure à 500 kg/m^2. Au niveau de la cote reliée à l'écaillage du mortier, elle varie entre 2 et 5 que ce soit avec cinq ou six laboratoires. Au niveau de la cote reliée à l'éclatement du granulat, elle varie entre A et C que ce soit avec cinq ou six laboratoires. La valeur moyenne des résidus massiques pour les six laboratoires est de 755 kg/m^2 et passe à 640 kg/m^2 en retirant le Laboratoire 5 avec un coefficient de variation respectif de 46 et 36 %. Les variations importantes observées entre les différents résultats ne peuvent être expliquées par les caractéristiques des chambres environnementales présentées dans les Tableaux 10.4 et 10.5.

Tableau 10.6 - Résultats finaux de l'échange interlaboratoires de 2020

Laboratoire		1	2	3	4	5	6
Plaque #1	Résidus (kg/m^2)	520	610	950	360	1400	750
	cote visuelle	5-A	5-C	4-A	2-B	5-A	5-A
Plaque #2	Résidus (kg/m^2)	300	610	990	540	1 270	N/A*
	cote visuelle	3-A	5-C	3-A	2-B	5-A	N/A*
Moyenne deux plaques	Résidus (kg/m^2)	410	610	970	450	1 335	750
Six laboratoires concernés en 2020	Moyenne des résidus (kg/m^2)	755 (640**)					
	Écart-type (kg/m^2)	350 (230**)					
	Coefficient de variation (%)	46 (36**)					
Écart du laboratoire p/r à la moyenne	Résidus (kg/m^2)	-345 (-230**)	-145 (-30**)	215 (330**)	-305 (-190**)	580 (N/A**)	-5 (115**)
	%	-46 (-36**)	-19 (-4)	29 (52**)	-40 (-29**)	77 (N/A**)	0,4 (18**)
Écart entre les deux résultats d'un même laboratoire	Résidus (kg/m^2)	220	0	40	180	135	N/A
	%	54	0	4	40	10	N/A

*fuite de solution saline, ** sans le laboratoire 5

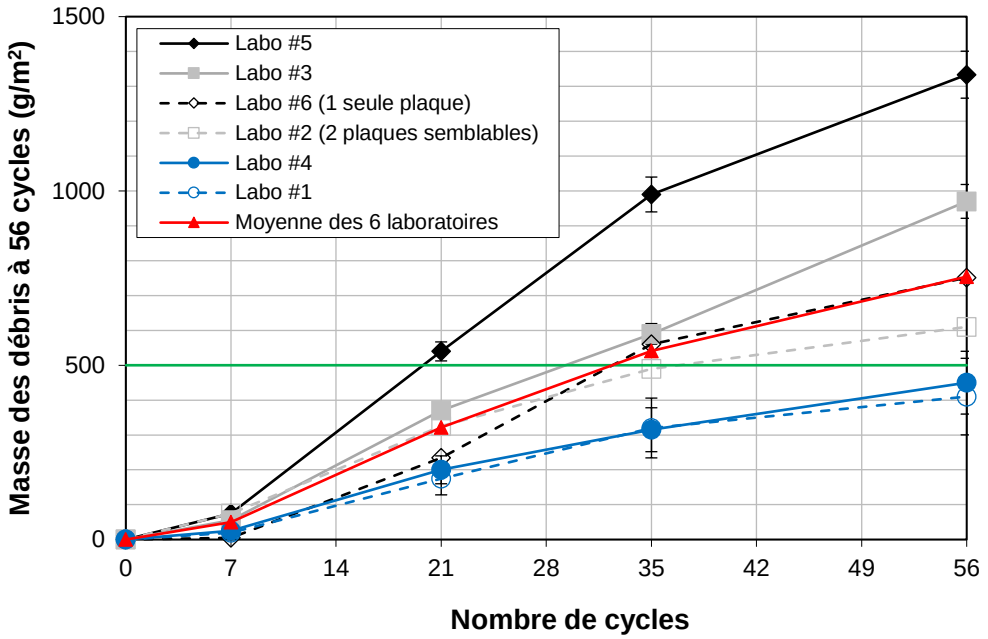


Figure 10.2 - Débris massiques en fonction des cycles d'écaillage pour les six laboratoires

Cette série d'essais interlaboratoires montre qu'une période de présaturation plus longue (14 jours au lieu de 7 jours, tel que réalisé par le Laboratoire 5) est très défavorable, car elle peut doubler la masse des débris après 56 cycles. Pour éliminer cet artéfact, les résultats du Laboratoire 5 sont donc exclus de l'analyse des essais interlaboratoires.

Les données du Tableau 10.6 indiquent que la moyenne des masses de débris des essais interlaboratoires est de 640 g/m^2. L'analyse globale des résultats (Chapitre 11) montrera que la moyenne obtenue pour les 17 sources granulaires et par les équipes du CRIB-Sherbrooke et du CRIB-Laval est comprise entre 570 et 610 g/m^2. La même matrice cimentaire a été utilisée pour tous ces essais (Type V-S avec le liant ternaire). Globalement la durabilité à l'écaillage de la matrice de Type V-S obtenue des essais interlaboratoires est donc compatible avec celle obtenue des essais réalisés par les laboratoires universitaires. Les deux séries d'essais conduisent donc à la même conclusion : la durabilité à l'écaillage de la matrice V-S testée n'est pas conforme puisque la masse des débris est supérieure à la limite maximale de 500 g/m^2.

Il faut noter que la dispersion des résultats des essais de laboratoire est très importante avec des coefficients de variation de l'ordre de 40%. Cette grande dispersion fait en sorte que les laboratoires 4 et 1 concluent, fort probablement fautivement, que la durabilité à l'écaillage du béton est conforme. À l'inverse, les résultats des laboratoires 3, 6 et 2 amènent à la conclusion inverse. Ces résultats suggèrent que la procédure normalisée BNQ 2621-905 utilisée manque de répétabilité inter-laboratoire.

La répétabilité dans un même laboratoire est généralement assez bonne et ce, même si les laboratoires 5 et 6 ont indiqué n'avoir pas respecté la procédure normalisée (Labo 5 : durée de la présaturation – Labo 6 : pas de mesure de température à l'interface). Il est encore difficile de déterminer si le manque de répétabilité inter-laboratoire résulte de la conception de la norme ou du non-respect de la procédure par les laboratoires participants. La norme semble encore trop imprécise pour s'assurer de l'homogénéité des cycles thermique dans tout le volume de l'enceinte thermique. Il faudrait proposer de nouvelles exigences pour s'assurer et démontrer que le cycle thermique spécifié à l'interface solution-béton soit le même pour toutes les localisations possibles des plaques dans l'enceinte. La seule mesure de l'écart de température ambiante maximale (< 2 C) dans la chambre à 250 mm ou moins des murs, plafond semble insuffisante.

10.3.2 Comparaison avec les résultats de 2016

Les résultats finaux de l'essai de résistance à l'écaillage de l'échange interlaboratoires de 2016 piloté par le MTQ, sont présentés dans le Tableau 10.7. Le béton testé en 2016 n'était pas le même que celui de cette étude. Ce sont donc principalement les coefficients de variation obtenus de chaque étude et le classement relatif des laboratoires qui peuvent être comparés. Le coefficient de variation était plus élevé en 2016 qu'en 2020 même si le Laboratoire 5 est pris en compte avec respectivement 53,2 et 46 %.

En 2016, le Laboratoire 4 était celui qui présentait la masse moyenne de résidus la plus élevée avec 2 420 kg/m^2 parmi les cinq laboratoires impliqués. En 2020, le Laboratoire 4 se classe cinquième en considérant la masse de résidu la plus élevée et quatrième si le Laboratoire 5 n'est pas pris en compte. En 2016, le Laboratoire 1 était celui qui présentait la masse moyenne de résidus la plus faible avec 440 kg/m^2 parmi les cinq laboratoires impliqués. En 2020, le Laboratoire 1 est également celui qui présente la masse moyenne de résidus la plus faible avec 410 kg/m^2 parmi les six laboratoires impliqués. Pour l'ensemble des laboratoires participants, la différence entre les masses moyennes de résidus maximale et minimale est de 1 980 kg/m^2 en 2016 et est réduite à 925 kg/m^2 en 2020 avec le Laboratoire 5 et à 560 kg/m^2 sans ce laboratoire.

Tableau 10.7 - Résultats finaux de l'échange interlaboratoire de 2016

Laboratoire (identification 2020)		1	2	3	4	5	6
Plaque A	Résidus (g/m^2)	460	840	1 520	2 480		
	cote visuelle	1-B	4	1-B	4		
Plaque B	Résidus (g/m^2)	420	1 120	1 640	2 350	N/A	N/A
	cote visuelle	1-B	4	4	4		
Moyenne 2 plaques	Résidus (g/m^2)	440	980	1 580	2 420		
Cinq laboratories de 2016	Moyenne des résidus (g/m^2)	1 380					
	Écart-type (g/m^2)	740					
	Coefficient de Variation (%)	53,2					
Écart du laboratoire p/r à la moyenne	Résidus (g/m^2)	-940	-400	200	1 040		
	%	-68,2	-29,1	14,2	74,6		
Écart entre les deux résultats d'un même laboratoire	Résidus (g/m^2)	40	280	120	130	N/A	N/A
	%	9,1	28,6	7,6	5,4		

11 ANALYSE GLOBALE DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente l'analyse détaillée des résultats expérimentaux présentés aux chapitres 8 et 9. Cette analyse est divisée en 9 sections, chacune dédiées à un des sous objectifs du projet.

11.1 INFLUENCE DU LAVAGE DES GRANULATS SUR LA RÉSISTANCE À L'ÉCAILLAGE

Les résultats d'écaillage présentés au chapitre 8 montrent que le lavage du gros granulat peut très nettement diminuer la masse des débris après 56 cycles. Ces résultats suggèrent que la propreté du gros granulat peut être un paramètre important de la durabilité à l'écaillage du béton.

La Figure 11.1 résume les résultats de la Figure 8,5. Elle permet de comparer la masse des débris de six sources granulaires testées avec et sans lavage du gros granulat. Le lavage du gros granulat a fortement diminué la masse des débris des sources 1, 2 et 4. La source 1 est dans la catégorie inférieure et les sources 2 et 4 sont dans la catégorie supérieure. Dans le cas des sources 7, 8 et 9, le lavage diminue la masse des débris mais de manière moins prononcée. Ces sources se retrouvent dans les trois catégories (inférieure, intermédiaire et supérieur). Il n'y a donc pas de lien évident entre les effets du lavage et la catégorie de performance du gros granulat. Ces résultats montrent cependant qu'un lavage peut donc être favorable pour la durabilité à l'écaillage, quelle que soit la catégorie de performance du gros granulat.

Pour expliquer l'effet favorable du lavage sur la durabilité à l'écaillage (masse des débris), on peut proposer l'hypothèse qu'un granulat propre offre une meilleure adhérence avec la pâte de ciment et le mortier. En adhérant mieux aux particules du gros granulat localisées près de la surface, la pâte et le mortier sont moins susceptibles de se détacher et de produire des débris d'écaillage.

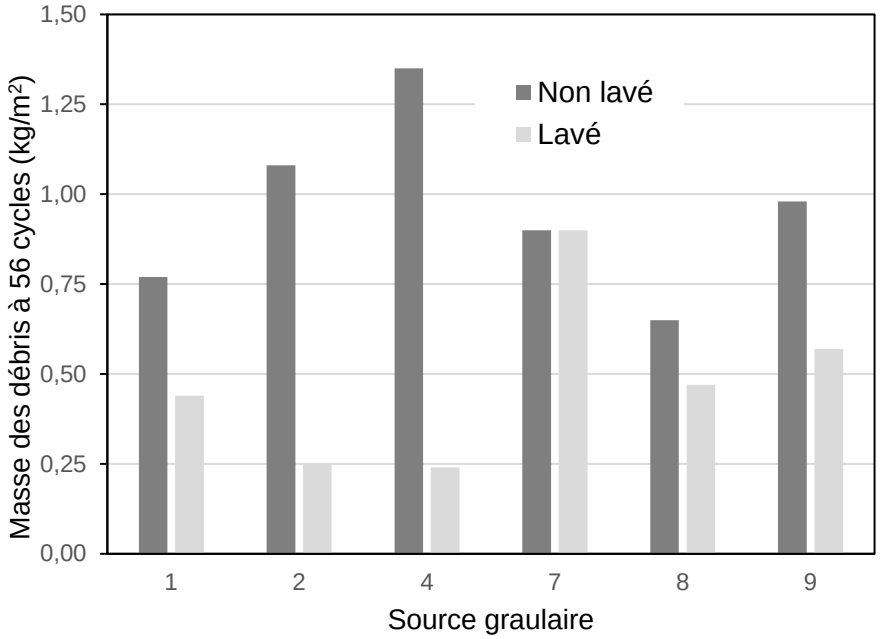


Figure 11.1 - Influence du lavage du gros granulat sur la masse des débris après 56 cycles

Pour valider cette hypothèse, on peut réanalyser les résultats de la figure 8.6 qui, pour faciliter l'analyse, est intégralement reproduite à la Figure 11.2. Dans cette figure, les barres rouges indiquent l'intensité du dégarnissement et les barres noires indiquent l'intensité de l'éclatement. Les résultats montrent

clairement que le lavage diminue la hauteur des barres rouge, mais n'a pas d'effet remarquable sur la hauteur des barres noires. Seul le dégarnissement de la source 7 augmente très légèrement suite au lavage. Cette source est probablement peu sale et ne profite donc pas des effets favorables du lavage.

Globalement, le lavage du gros granulat diminue les dégarnissements mais n'a pas d'effet sur l'éclatement des particules. L'absence d'effet sur l'éclatement semble logique puisque le fait de laver une particule de gros granulat ne change pas sa microstructure et ne peut donc pas avoir d'impact sur sa capacité intrinsèque à résister à l'attaque par les cycles de gel-dégel. Ces résultats suggèrent donc que la plus faible masse des débris des granulats lavés découlerait principalement d'une meilleure adhérence de la pâte ou du mortier avec le gros granulat. Lors de l'essais d'écaillage, la pâte et le mortier sont donc moins susceptibles de se détacher du gros granulat et de contribuer à augmenter la masse des débris.

Le lavage des sources 1 et 8 (catégorie 3) a très peu d'effet sur le dégarnissement des granulats de la catégorie 3. Ces deux sources sont les plus susceptibles à l'éclatement. Elles ne peuvent donc pas dégarnir puisqu'elles ont tendance à éclater avant de produire un dégarnissement important.

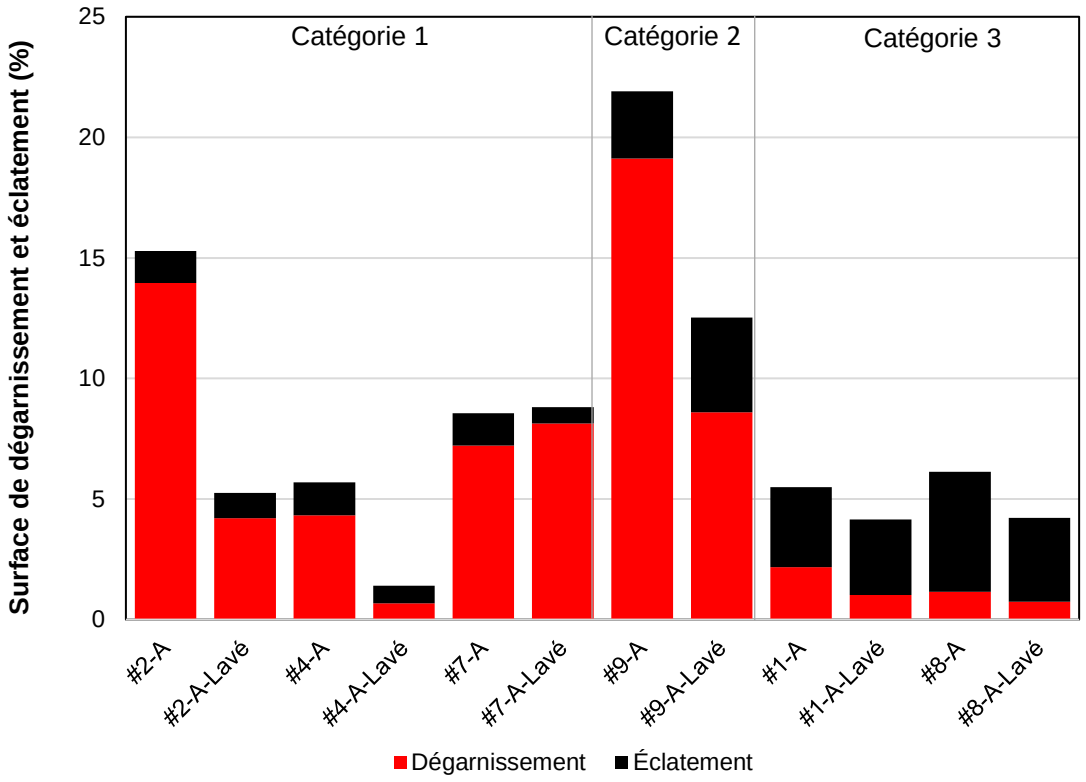


Figure 11.2 - Influence du lavage sur les surfaces de dégarnissement et d'éclatement des sources granulaires 1, 2, 4, 7, 8 et 9

Après vérification, aucune corrélation n'a pu être établie entre le % de particules fines (< 80 µm) déterminé lors de l'essai CSA A23.2-5A (2019) et les différents paramètres potentiellement sensibles à la propreté du gros granulat lors de l'essai d'écaillage, soit le % de débris et le % de dégarnissement. Les granulats des sources 2, 4 et 9 qui ont montré un fort effet du lavage sur le % de dégarnissement montrent un % de particules < 80 µm de 1,8 %, 1,4 % et 1,3 %, respectivement, alors que les sources 7, 1 et 8 où aucun effet n'a été observé ont montré un % de particules < 80 µm de 0,7 %, 1,6 % et 2,1 %, respectivement. De plus,

on ne peut pas conclure sur l'influence des particules passant le tamis de 5 mm sur le dégarnissement car la mesure des éclatement et dégarnissement ne prend en compte que les particules de 5 mm et plus.

11.2 INFLUENCE DE LA LOCALISATION DES ÉPROUVETTES DANS L'ENCEINTE DE GEL-DÉGEL SUR LA RÉSISTANCE À L'ÉCAILLAGE

Un des objectifs de la phase 1 est de valider l'homogénéité des conditions d'essais dans la chambre d'écaillage et de choisir une localisation unique pour les autres phases de l'étude. La section 9.3.1 a montré qu'il y a peu de variations associées à la localisation dans la chambre. En effet, les résultats présentés à la Figure 9.4 ne permettent pas de conclure sur un effet de la localisation des plaques sur les résultats à l'essai d'écaillage.

L'enceinte utilisée à l'Université de Sherbrooke comporte cinq puissants ventilateurs localisés dans le haut du mur du fond (Figure 11.3). Ces ventilateurs produisent un fort brassage de l'air pour s'assurer que les conditions de température sont les plus homogènes possibles dans tout le volume de l'enceinte. Il faut noter que les ventilateurs ne fonctionnent pas en permanence. Cette enceinte a fait l'objet d'une analyse des conditions climatiques intérieures, dans le cadre d'une étude réalisée par le MTQ et intitulée : *Rapport de visites de chambres d'écaillage du béton - Projet DB-19-29* [31]. Plusieurs informations sont notées : les dimensions de la chambre (hauteur, largeur, longueur), l'espacement entre les tablettes et des mesures de vent. Les mesures sont prises dans les huit coins ainsi que trois mesures au centre de l'enceinte (au plafond, au centre et au plancher). Des mesures ont aussi été prises au-dessus des plaques présentes ainsi qu'à la source du vent. La vitesse moyenne (m/s) et la vitesse maximale (m/s) ont été prises à chaque endroit. Le Tableau 11.1 présente les principales caractéristiques physiques de l'enceinte utilisée à l'Université de Sherbrooke [31].

Figure 11.3 - Intérieur de l'enceinte d'écaillage de l'Université de Sherbrooke [31].

Tableau 11.1 - Principales caractéristiques physiques de l'enceinte d'écaillage de l'Université de Sherbrooke [31]

Informations sur la chambre		
Largeur	1890	mm
Hauteur	2600	mm
Longueur	2650	mm
Hauteur entre les tablettes	200	mm
Capacité	120	Plaques
Nombre de plaques au moment du test	3	Plaques
Vitesse moyenne à la source	2,28	m/s
Vitesse maximale à la source	2,47	m/s
Volume	13,02	m3

Les résultats de l'étude du MTQ indiquent que la vitesse moyenne du vent dans les coins est de 0,62 m/s. La vitesse est plus élevée au centre de l'enceinte avec une moyenne de 1,41 m/s [31]. Les vitesses les plus faibles ont été mesurées au niveau des étagères utilisées pour recevoir les plaques d'écaillage. Elles sont comprises entre 0,16 m/s et 0,48 m/s, avec une moyenne de 0,32 m/s. Le coefficient de variation est de 33%. Il y a donc une hétérogénéité des conditions de transfert thermique au niveau des plaques d'écaillage. Il peut donc y avoir des taux de gel différents d'une plaque à l'autre et, par conséquent, un impact sur la sévérité des essais d'écaillage. Il faut prendre en compte que la masse des débris est une moyenne de deux plaques. Cette moyenne contribue à diminuer la variabilité des conditions de gel sur le résultat de l'écaillage.

Globalement, même si l'homogénéité n'est pas parfaite, l'enceinte de gel-dégel est jugée tout à fait acceptable pour réaliser le reste du programme expérimental. L'emplacement gauche a été choisi car la paire de plaques placée à cet endroit n'a jamais présenté des valeurs extrêmes des trois moyennes (gauche - milieu - droite). Cela explique la position indiquée dans la colonne « emplacement » des tableaux 9.9 à 9.14 présentant les résultats aux essais d'écaillage.

11.3 ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LA DURABILITÉ À L'ÉCAILLAGE ET LES PERTES AUX ESSAIS MICRO-DEVAL ET GEL-DÉGEL NON CONFINÉ

L'analyse des relations entre la durabilité à l'écaillage et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné a été réalisée en fusionnant les résultats d'essais obtenus par le CRIB-Laval et par le CRIB-Sherbrooke. Comme expliqué précédemment, toutes les sources granulaires ont été testées à l'écaillage par l'Université Laval. L'Université de Sherbrooke a testé un sous-ensemble de sept sources granulaires. À l'Université Laval, la durabilité à l'écaillage est mesurée à partir de la moyenne de trois plaques d'écaillage. À l'Université de Sherbrooke, la durabilité à l'écaillage des sept sources granulaires a été obtenue à partir d'une moyenne de six plaques d'écaillage par source granulaire.

Il est important de préciser que dans chaque université, les sources granulaires ont été testées d'une manière totalement indépendante. C'est-à-dire que chaque université a gâché ses propres bétons, a produit ses éprouvettes d'écaillage, et que son personnel a réalisé la finition de surface et les essais d'écaillage dans les enceintes disponibles dans chacun des deux laboratoires. Seul le type de liant, le sable, les sources de gros granulats et les adjuvants ont été partagés entre les deux laboratoires. Cette approche

indépendante renforce l'analyse, car elle permet de prendre en compte la variabilité potentielle des résultats entre les deux laboratoires ayant réalisé le programme expérimental.

11.3.1 Analyse de toutes les sources granulaires

La Figure 11.4 présente les mesures des masses de débris pour toutes les sources granulaires et pour les deux laboratoires. Les masses de débris sont exprimées en fonction de la perte à l'essais micro-Deval et de la perte à l'essai de gel-dégel non confiné. Les masses de débris sont représentées par des cylindres. Les cylindres bleus sont les résultats de l'Université Laval et les cylindres gris sont les résultats de l'Université de Sherbrooke. Sur la Figure 11.4, les cylindres sont positionnés en fonction de la coordonnée X (perte micro-Deval) et de la coordonnée Y (perte au gel-dégel non confiné). Les coordonnées X-Y sont les parties entières des deux pertes numériques. Par exemple, pour des pertes micro-Deval et gel-dégel de 15,2 % et 7,8 % les coordonnées X-Y seront : 15-7.

Il faut noter que le positionnement des cylindres gris n'est pas tout à fait exact car il est impossible de superposer les résultats des deux laboratoires à la même coordonnée sur le graphique. C'est donc le résultat de l'Université Laval qui est correctement exprimé en fonction des deux pertes. Les cylindres gris ont été positionnés le plus près possible des cylindres bleus correspondant dans le but de mieux comparer les résultats obtenus par les deux laboratoires.

Une première analyse des résultats de la Figure 11.4 montre que globalement, les masses de débris obtenues par les deux laboratoires sont consistantes. La source 2 présente toutefois une grande différence entre les deux laboratoires. Le granulat de cette source se compose de particules concassées à partir de roches ignées métamorphisées (granite métamorphisée, plus ou moins altéré, granodiorite et syénite) ; il possède un nombre pétrographique moyen de 130 (i.e. qualité physico-mécanique « passable » ; section 5.2). De plus, les particules étaient plutôt bien recouvertes de poussière de concassage. Pour la source 11, l'écart est aussi important entre les résultats des deux laboratoires. Le granulat de cette source est composé de différents faciès d'une roche sédimentaire de type calcaire (section 5.11). Il n'est pas possible d'expliquer ces grands écarts. Plusieurs facteurs peuvent intervenir comme, par exemple, la méthode de finition de surface et le réseau de bulles d'air.

Pour le sous-ensemble de sept sources granulaires, les deux laboratoires obtiennent la même moyenne générale de 0,57 kg/m^2 pour la masse des débris, ce qui est logique et consistant puisque c'est la même matrice cimentaire qui est testée. Pour l'ensemble des sources granulaires, la moyenne générale est 0,61 kg/m^2. Les deux moyennes sont très proches puisque c'est la même matrice cimentaire. Globalement, ces premiers résultats suggèrent que les deux laboratoires obtiennent des durabilités comparables. Une masse de débris moyenne de 0,6 kg/m^2 indique que la durabilité à l'écaillage de la matrice de Type V-S produite avec le liant ternaire n'est pas conforme car elle dépasse légèrement la limite maximale de 0,5 kg/m^2.

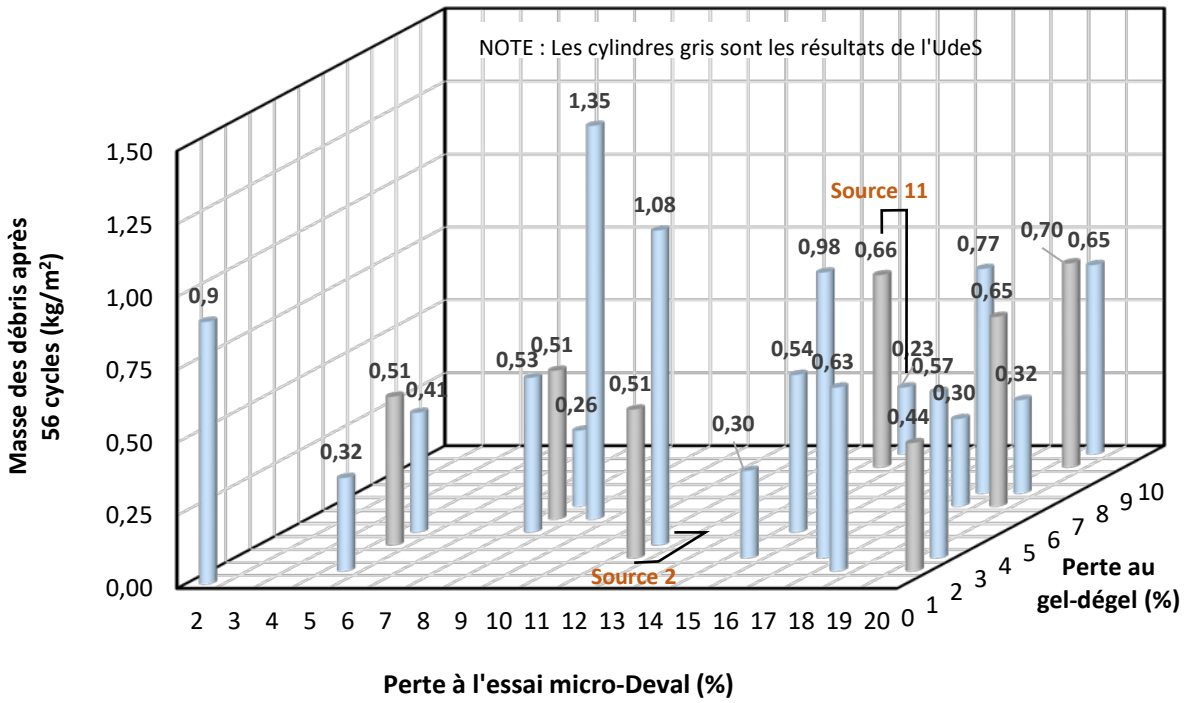


Figure 11.4 - Masse des débris en fonction des pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné (les cylindres bleus sont les résultats du CRIB-Laval et les cylindres gris sont ceux du CRIB-Sherbrooke)

L'analyse des résultats de la Figure 11.4 montre qu'il n'y a pas de relation claire entre la masse des débris et les pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné. Par exemple, on ne constate pas de tendance générale à la hausse de la masse des débris lorsque les pertes sont élevées. Ces résultats apparaissent logiques puisque la masse des débris est principalement produite par l'endommagement de la matrice de mortier, qui est la même pour tous les essais. Même si la masse des débris peut sans doute être amplifiée par le dégarnissement et l'éclatement des particules du gros granulat, cette contribution ne semble pas suffisamment importante pour produire un effet clairement mesurable, permettant de faire ressortir le comportement respectif des différentes sources de granulats par l'essai d'écaillage.

La Figure 11.5 présente la relation entre la surface d'éclatement et les pertes aux essais micro-Deval et au gel-dégel non confiné. Comme pour la figure précédente, les cylindres gris sont les résultats obtenus à l'Université de Sherbrooke. Une première observation de la Figure 11.5 montre qu'il existe une tendance générale assez claire entre la surface d'éclatement et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non-confiné. La réponse (surface d'éclatements) montre une nette tendance à la hausse lorsque les deux pertes augmentent. Les surfaces d'éclatement les plus élevées (> 2,5%) sont majoritairement obtenues avec les sources ayant une combinaison de perte micro-Deval supérieure à 15% et une perte au gel-dégel non-confiné supérieure à 6% (le secteur Nord-Est de la Figure 11.5). À l'inverse, les surfaces d'éclatement les plus faibles (< 2%) sont majoritairement obtenues avec une combinaison de pertes micro-Deval inférieure à 15% et une perte au gel-dégel non-confiné inférieure à 6% (le secteur Sud-Ouest de la Figure 11.5). Ces

deux caractéristiques intrinsèques du gros granulat semblent donc des indicateurs potentiellement utiles pour estimer ou prédire la susceptibilité d'un granulat aux éclatements lors d'un essai d'écaillage.

D'un laboratoire à l'autre (gris vs bleu), la méthode de caractérisation de la surface d'éclatement est plus consistante que la caractérisation de la masse des débris. Les écarts sont plus faibles et les grands écarts constatés pour les sources 2 et 11 ne sont pas présents sur la Figure 11.5. Globalement, ces résultats suggèrent que la mesure expérimentale de la surface d'éclatement semble plus fiable pour caractériser la durabilité du gros granulat lors d'un essai d'écaillage. La mesure de la surface d'éclatement est plus directement liée à la durabilité du gros granulat, car elle exclue la contribution découlant de l'endommagement de la matrice de mortier. La comparaison des résultats des Figures 11.4 et 11.5 le démontre clairement.

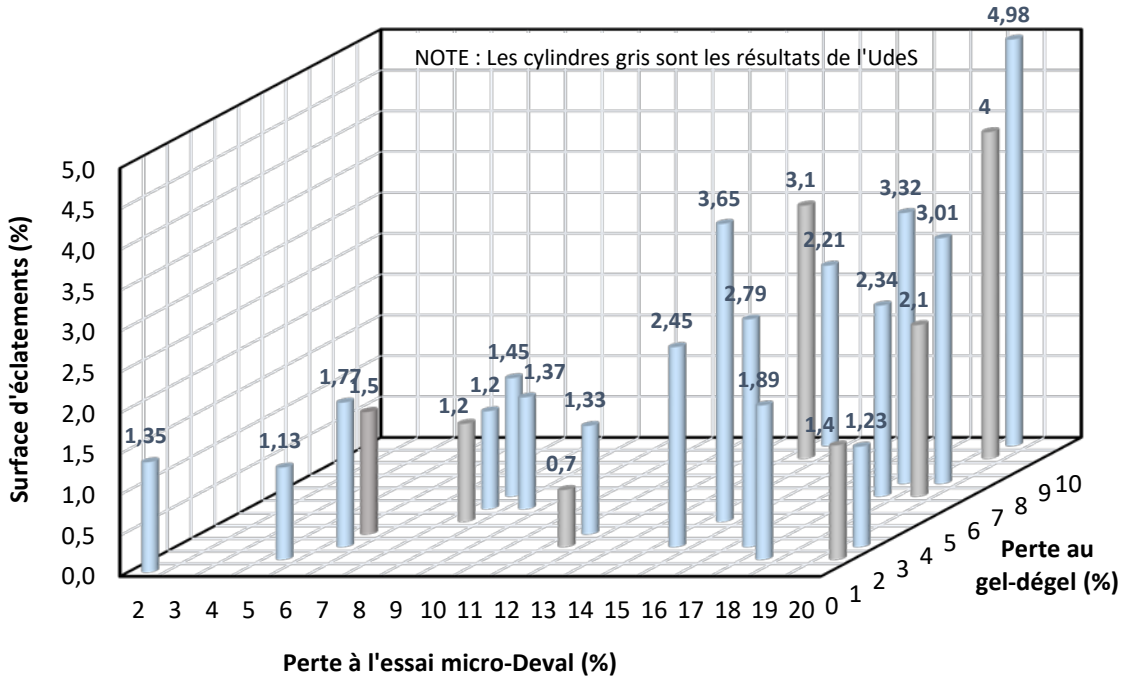


Figure 11.5 - Surface d'éclatement en fonction des pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné (les cylindres bleus sont les résultats de l'Université Laval et les cylindres gris sont ceux l'Université de-Sherbrooke)

La Figure 11.6 présente la relation entre la surface de dégarnissement et les pertes aux essais micro-Deval et au gel-dégel non confiné (les cylindres gris sont les résultats de l'Université de Sherbrooke). Une première analyse indique qu'il n'y a pas de relation claire entre la surface de dégarnissement et les pertes aux essais micro-Deval et au gel-dégel non-confiné. Globalement, les résultats sont essentiellement divisés en deux catégories de sources granulaires : les sources avec un dégarnissement de moins de 4% et les sources avec un dégarnissement de plus de 4% (2, 4, 7, 9, 15, 17). Pour ce deuxième groupe, l'analyse présentée à la section 11.1 (Figure 11.2) a montré que le lavage des sources 2, 4 et 9 a diminué le dégarnissement par un facteur d'au moins 2.

Les résultats de la Figure 11.6 montrent que la surface de dégarnissement n'est pas liée à l'intensité de la perte micro-Deval ou de la perte au gel-dégel non-confiné. Ces deux caractéristiques intrinsèques du gros granulat ne sont donc pas des indicateurs fiables pour estimer ou prédire la susceptibilité d'un granulat au dégarnissement lors d'un essai d'écaillage.

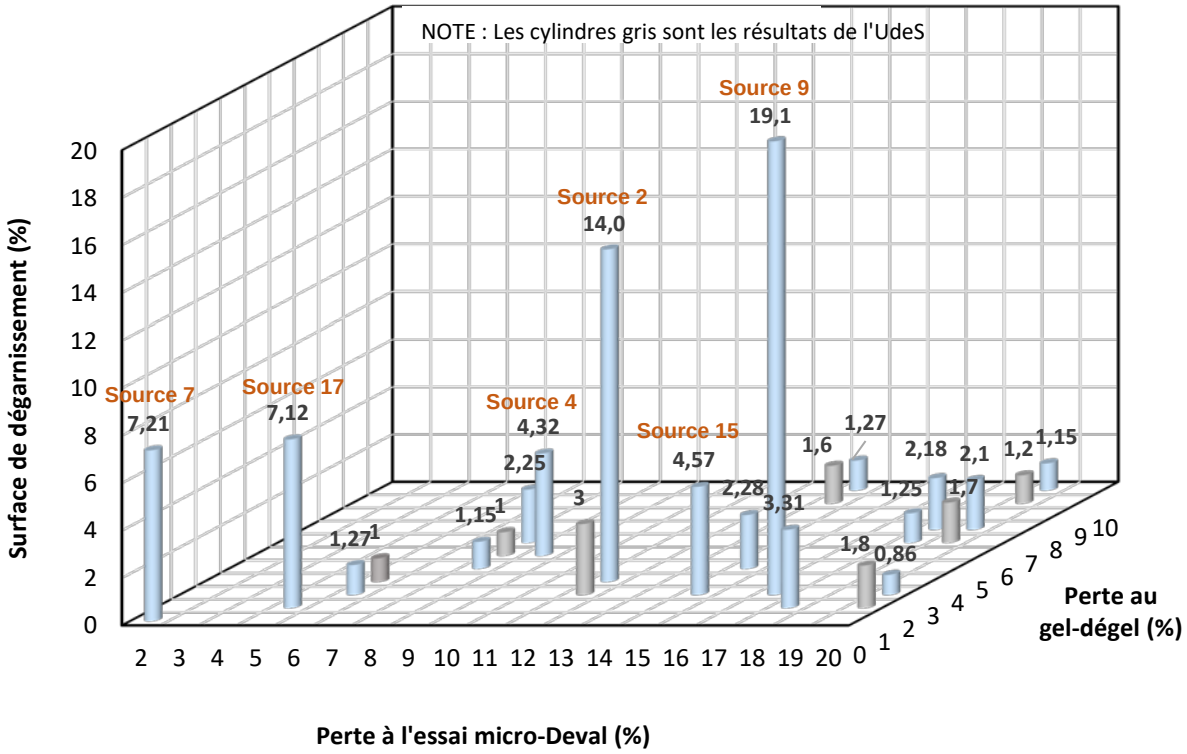


Figure 11.6 - Surface de dégarnissement en fonction des pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné (les cylindres bleus sont les résultats du CRIB-Laval et les cylindres gris sont ceux du CRIB-Sherbrooke)

11.3.2 Analyse du sous-ensemble de sept sources granulaires

11.3.2.1 Masse des débris

Cette analyse vise à déterminer s'il est possible d'établir plus précisément un lien entre les pertes aux essais de gel-dégel non confiné et micro-Deval et l'intensité des pertes massiques à l'essai d'écaillage. Elle se base sur les résultats de la phase 1 (programme expérimental de l'Université de Sherbrooke) qui consistait à produire sept bétons avec sept sources granulaires (trois paires de plaques pour chacune des sources). Les sources utilisées sont 1, 8, 3, 11, 14, 2 et 12 dans leur ordre de classification de qualité définie précédemment (Inférieure : sources 1 et 8 - Intermédiaire : sources 3, 11 et 14 - Supérieure : sources 2 et 12).

Les résultats de la figure 11.7 montrent la masse des débris après 56 cycles de gel-dégel en fonction de la source granulaire. Les traits verticaux indiquent les valeurs minimales et maximales obtenues avec les six

plaques. Trois sources (1, 8 et 11) ont une masse moyenne de débris dans la plage 650 ± 50 g/m^2. Les quatre autres sources ont une masse moyenne de débris dans la plage 450 ± 50 g/m^2.

Globalement, pour toutes les sources, la masse moyenne des débris est de 550 g/m^2, ce qui est légèrement supérieur à la limite de 500 g/m^2 spécifiée dans la norme BNQ 2621-905. Même pour les deux sources de la catégorie supérieure (2 et 12), la masse moyenne des débris est très proche de la limite de 500 g/m^2. Les masses des débris sont élevées pour une matrice de Type V-S. Ces résultats suggèrent que le liant ternaire utilisé pour cette étude pourrait être la cause de cette durabilité à l'écaillage tout juste acceptable ou légèrement inférieure aux spécifications de durabilité de la norme BNQ 2621-905.

Les résultats de la Figure 11.7 suggèrent qu'il n'y a pas de relation claire entre les masses des débris et les pertes au gel-dégel non confiné ou micro-Deval. Au niveau de l'aspect visuel, on remarque que les plaques des sources 1, 3, 8 et 11 présentent une plus grande quantité d'éclatements. Cette caractéristique de durabilité sera analysée plus en détails dans les parties qui suivent.

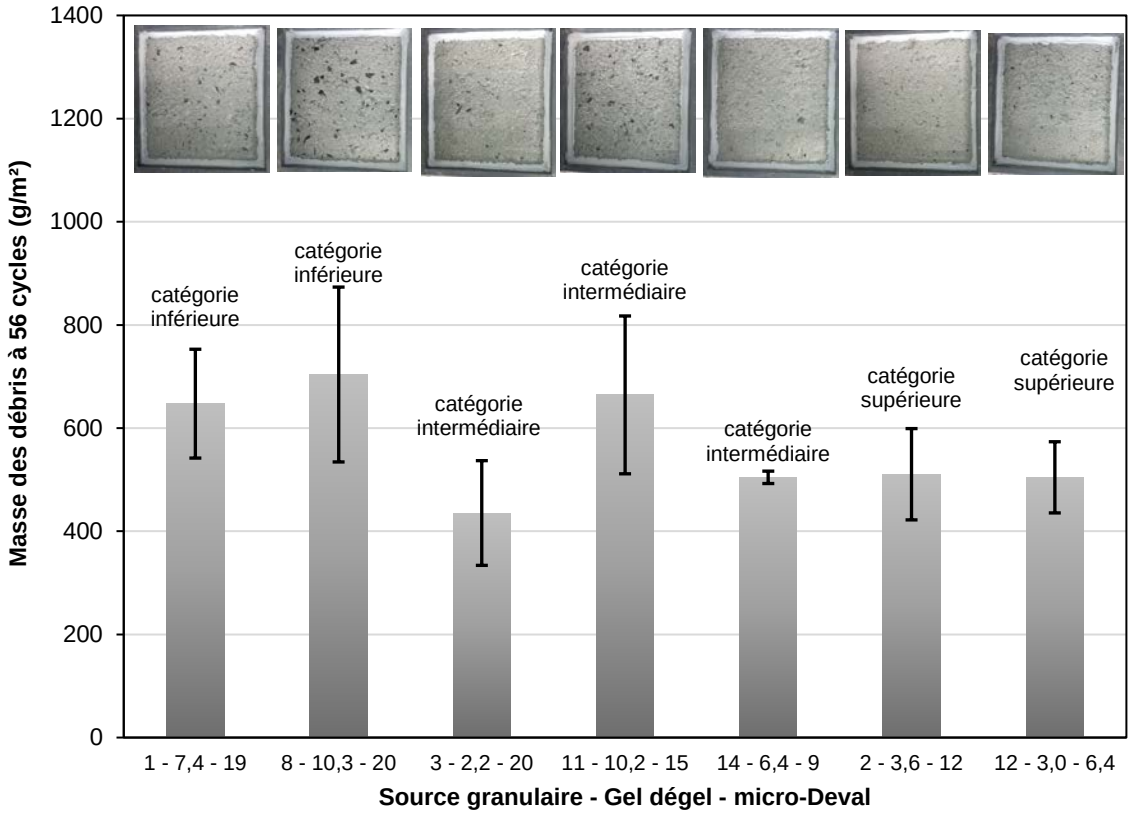


Figure 11.7 - Aspect visuel et masse des débris en fonction de la source granulaire et des pertes aux essais de gel-dégel et micro-Deval.

Les Figures 11.8 et 11.9 présentent plus spécifiquement les relations entre la perte au gel-dégel non confiné et la masse des débris (Figure 11.8) et la relation entre la perte micro-Deval et la masse des débris (Figure 11.9). Chaque point sur ces graphiques représente la moyenne des essais réalisés pour chacun des groupes d'échantillons testées.

Les résultats de la Figure 11.8 montrent que les masses des débris les plus faibles (450 ± 50 g/m^2) sont obtenues avec les sources granulaires ayant une perte au gel-dégel inférieure à 7 %. Les sources granulaires ayant une perte au gel-dégel non confiné supérieure à 7 % ont produit des masses des débris plus élevées, dans la plage 650 ± 50 g/m^2. Pour chacune de ces deux familles de résultats, il ne semble pas y avoir de relation entre l'intensité de la perte au gel-dégel et l'intensité de la masse des débris. C'est-à-dire que pour les pertes au gel-dégel inférieures à 7 %, la masse de débris est globalement peu variable. Le même constat s'applique aussi à la catégorie des pertes au gel-dégel supérieures à 7 %. La Figure 11.9 présente la relation entre la perte micro-Deval et la masse des débris. Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de relation entre la perte micro-Deval et la masse de débris. Il est seulement constaté que pour les pertes micro-Deval les plus élevées (supérieure à 14 %) la masse des débris est plus variable (600 ± 150 g/m^2).

Globalement, la corrélation est faible entre la masse des débris et les pertes au gel-dégel non confiné et micro-Deval. À partir de ce sous-ensemble de sept sources granulaires, on en arrive donc à la même conclusion que celle obtenue de l'analyse de l'ensemble des sources granulaires (paragraphe 11.3.1). Ce résultat était prévisible puisque la majorité de la masse des débris provient de l'endommagement du mortier. Mais il est possible que les masses des débris les plus élevées puissent résulter d'une contribution significative découlant de l'éclatement des particules de gros granulat. L'analyse subséquentes des surfaces éclatées et dégarnies permettra de déterminer la validité de cette hypothèse.

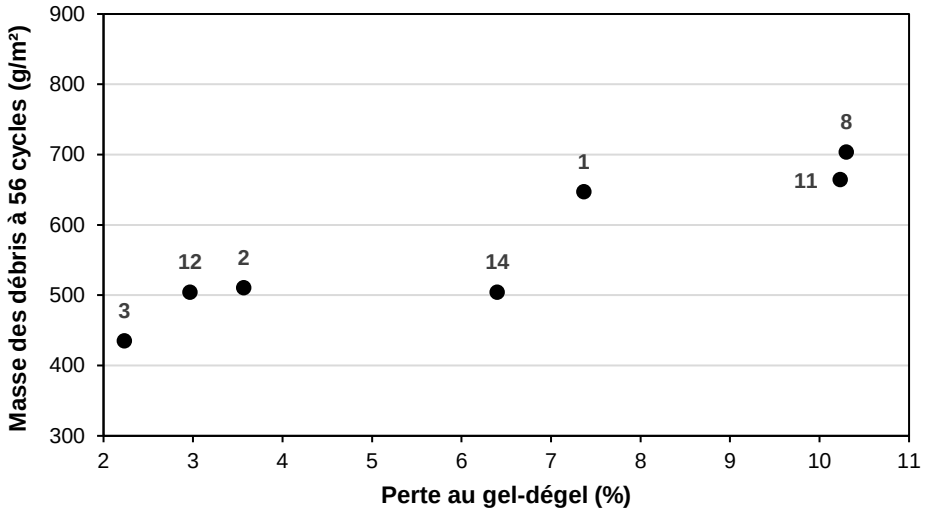


Figure 11.8 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et de la perte à l'essai de gel-dégel non confiné.

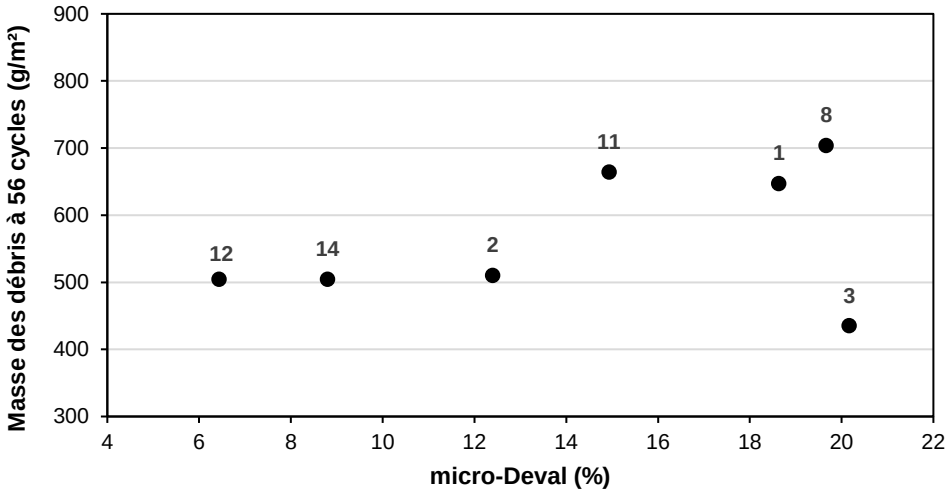


Figure 11.9 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et de la perte à l'essai micro-Deval.

11.3.2.2 Surfaces d'éclatements

L'analyse effectuée au paragraphe 11.3.1 (ensemble des sources granulaires) a montré qu'il existe une relation entre la surface d'éclatement et les pertes à l'essai micro-Deval et à l'essai de gel-dégel non confiné. Cette relation a notamment été mise en évidence à l'aide de la Figure 11.5. Ce paragraphe vise à confirmer cette relation à partir du sous-ensemble de sept sources granulaires. Ce sous-ensemble de résultats possède une fiabilité additionnelle, car chaque mesure de la surface d'éclatement est obtenue à partir de la moyenne de six plaques d'écaillage.

La Figure 11.10 synthétise les résultats de l'aspect visuel des plaques d'écaillage, la surface d'éclatement et la perte à l'essai de gel-dégel non confiné pour chacune des sept sources granulaires. On constate que pour une perte au gel-dégel inférieure à 8%, la surface d'éclatements est inférieure à 2,5%. Les deux sources ayant des pertes au gel-dégel supérieures à 10% montent une surface d'éclatement comprise entre 3% et 4%.

Au niveau visuel, les sources avec une perte au gel-dégel inférieure à 4% montrent des surfaces de couleur homogène avec très peu de taches plus foncées correspondant à l'exposition directe des particules du gros granulat. À l'inverse, les surfaces d'éclatements des sources 8 et 11 se démarquent avec une plus grande abondance de taches foncées. L'aspect visuel de plaques à la fin des cycles d'écaillage peut être apprécié plus en détail à partir des photos présentées à l'Annexe 3.

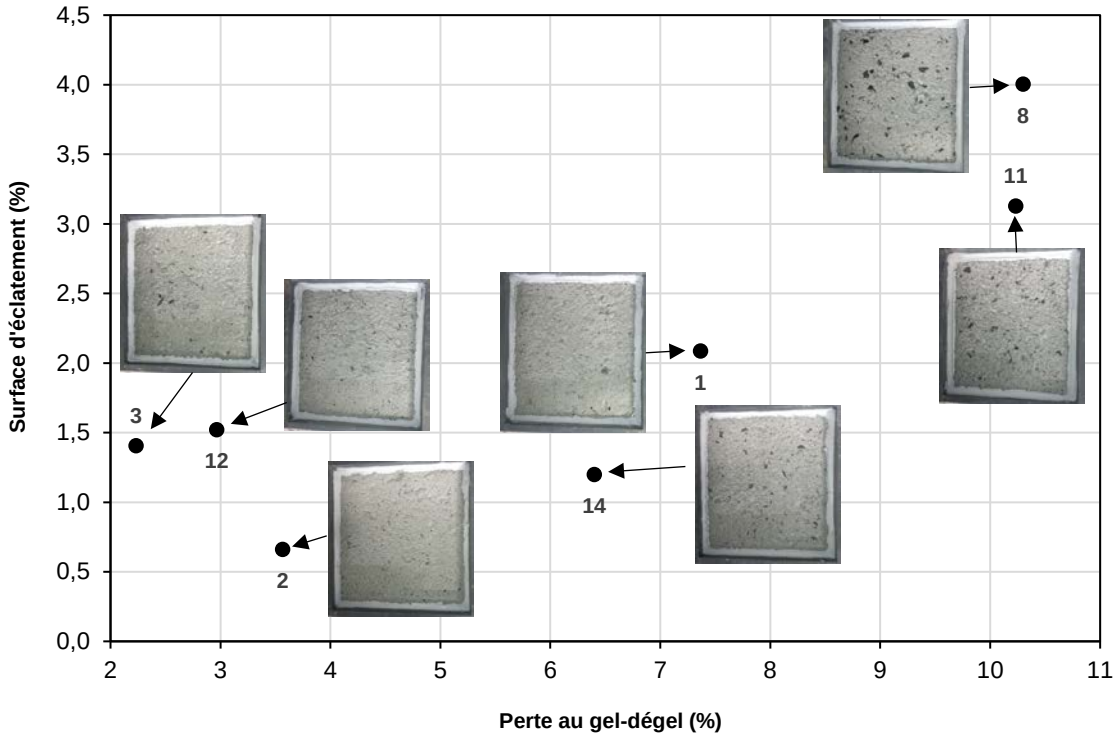


Figure 11.10 - Aspect visuel et surface d'éclatement en fonction de la perte au gel-dégel non confiné

11.3.2.3 Surface de dégarnissements

L'analyse effectuée au paragraphe 11.3.1 (ensemble des sources granulaires) a montré qu'il n'y a pas de relation claire entre la surface de dégarnissement et les pertes à l'essai micro-Deval et à l'essai de gel-dégel non confiné. Cette absence de relation a notamment été mise en évidence à l'aide de la Figure 11.6. Ce paragraphe vise à vérifier cette hypothèse à partir du sous-ensemble de sept sources granulaires. Ce sous-ensemble de résultats possède une fiabilité additionnelle car chaque mesure de la surface de dégarnissement est obtenue à partir de la moyenne de six plaques d'écaillage.

La Figure 11.11 confirme qu'il n'existe pas de relation claire entre la surface de dégarnissement et la perte à l'essai micro-Deval. La plage de surface de dégarnissement est comprise entre 1% et 3% quelle que soit la perte micro-Deval variant entre 6% et 21%. De plus, l'aspect visuel n'est pas bien corrélé avec la surface de dégarnissement et la perte micro-Deval. Par exemple, on constate, que l'aspect visuel des plaques correspondant aux sources 11 et 8 est dégradé par rapport à celui des sources 1 et 3 alors que ces dernières ont une surface de dégarnissement pourtant plus élevée et une perte micro-Deval plus élevée (source 3).

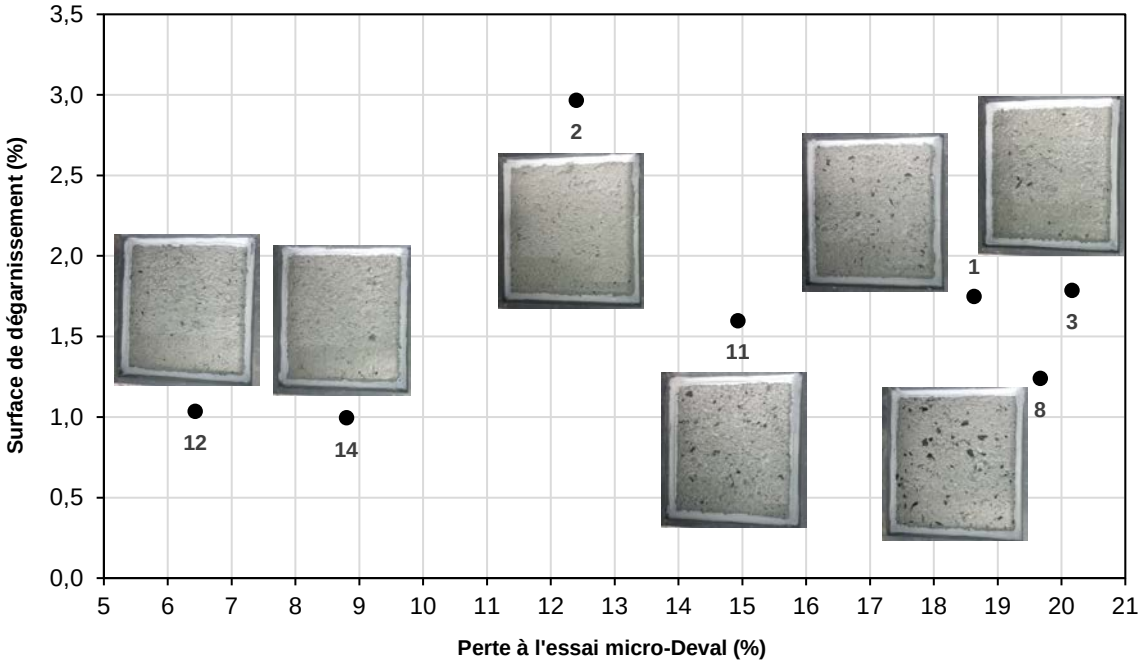


Figure 11.11 - Surface de dégarnissement en fonction de la perte à l'essai micro-Deval.

11.3.2.4 Somme des surfaces d'éclatements et de dégarnissements

L'aspect visuel d'une plaque à la fin d'un essai d'écaillage pourrait être corrélée avec la somme des surfaces d'éclatement et de dégarnissement, puisque que ce sont les deux types d'endommagement pouvant exposer les particules de gros granulat. La Figure 11.12 contribue à évaluer la validité de cette hypothèse. Elle présente, pour chaque source granulaire, l'aspect visuel des plaques d'écaillage, la somme des surfaces d'éclatement et de dégarnissement et la somme des pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné.

On constate une tendance nette qui montre que la somme des surfaces d'éclatement et de dégarnissement augmente en fonction de la somme des pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné. En effet, on constate une dégradation progressive de l'aspect visuel des plaques avec l'augmentation de la somme des pertes micro-Deval et gel-dégel. Ces résultats suggèrent que ce type de relation pourrait être utile pour aider à prévoir l'aspect visuel d'un béton à l'écaillage en fonction de certaines propriétés intrinsèques des granulats qui le compose, comme par exemple, la somme des pertes aux essais micro-Deval et de gel-dégel non-confiné.

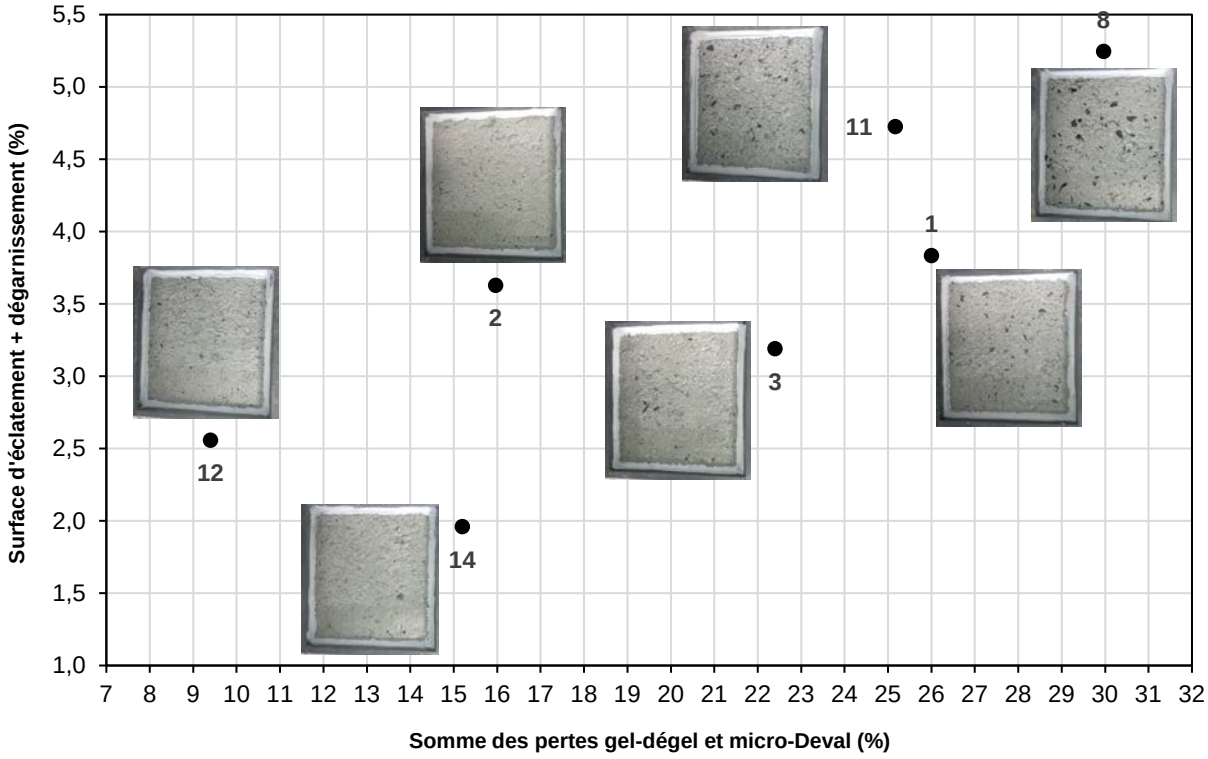


Figure 11.12 - Aspect visuel et somme des surfaces d'éclatement et de dégarnissement en fonction de la somme des pertes au gel-dégel et micro-Deval.

11.3.3 Proposition d'une limite maximale de la surface d'éclatement en fonction de l'aspect visuel des plaques d'écaillage

L'éclatement superficiel des particules de gros granulat, à la surface d'un béton exposé à des conditions susceptibles de produire un écaillage, n'a pas de conséquence significative sur la résistance mécanique ou la fonctionnalité technique des structures en béton. Il faut cependant préciser que l'utilisation de granulats gélifs peut provoquer la fissuration interne à la périphérie des dalles de bétons exposées à des cycles de gel-dégel en condition de saturation (D-Cracking). Pour ce type de dommage, la fonctionnalité technique des éléments en bétons est fortement compromise (Figure 11.13). De plus, la destruction complète d'un gros granulat localisé dans la couche externe d'enrobage de l'acier d'armature peut localement diminuer l'épaisseur d'enrobage et diminuer la protection contre la corrosion des aciers d'armature.

Figure 11.13 - Aspect typique de la fissuration périphérique de dalles de béton contenant des granulats gélifs (D-Cracking) [30].

Pour la problématique spécifique de cette étude, le principal impact de l'éclatement des particules concerne l'aspect esthétique des éléments affectés. L'impact esthétique défavorable résulte de l'apparition de zones localisées de couleur plus ou moins sombre qui produisent une apparence tachetée des surfaces. Le seuil de tolérance de ce type de dommage est très subjectif. Il dépend non seulement de l'appréciation de chaque individu, mais aussi de l'environnement urbain, industriel ou résidentiel dans lequel se produit ce phénomène. Par exemple un éclatement, même sévère, peut possiblement être toléré dans un contexte industriel ou la fonctionnalité technique domine largement sur la qualité esthétique des surfaces en béton. À l'inverse, en milieu urbain ou résidentiel, un éclatement bien plus léger d'un trottoir, d'un mur de soutènement ou d'une façade en béton peut s'avérer intolérable. Il faut aussi prendre en compte la teinte particulière de l'éclatement qui peut varier d'un type de granulat à l'autre. Par exemple, les granulats de couleur plus foncée produisent des éclatements plus contrastés et donc plus visibles.

Même si cela est relativement complexe et subjectif, il serait utile de pouvoir fixer un critère esthétique définissant un seuil de performance de la qualité esthétique d'une surface de bétons présentant des éclatements. Ce seuil de performance pourrait ensuite être utilisé pour identifier les caractéristiques intrinsèques des sources granulaires permettant de satisfaire au mieux ce seuil de performance. Les photos de la Figure 11.14 sont présentées pour illustrer la qualité visuelle de la surface en fonction du pourcentage d'éclatement des particules du gros granulat après un essai d'écaillage. Logiquement, l'appréciation de la qualité visuelle de la surface devrait aussi prendre en compte la surface de dégarnissement. L'impact du dégarnissement sur la qualité visuelle est moins important que celui de l'éclatement. Pour simplifier l'analyse, la surface de dégarnissement n'a pas été prise en compte pour cette évaluation de la qualité visuelle des plaques.

Il faut bien noter que les surfaces présentées à la Figure 11.14 ne correspondent pas nécessairement aux surfaces réelles des mêmes bétons exposés à des conditions naturelles de gel-dégel en présence de sels de déglaçage. Une étude supplémentaire serait requise pour mieux comprendre comment se comparent l'aspect visuel des surfaces écaillées en laboratoire avec celles des bétons soumis à des conditions réelles d'exposition.

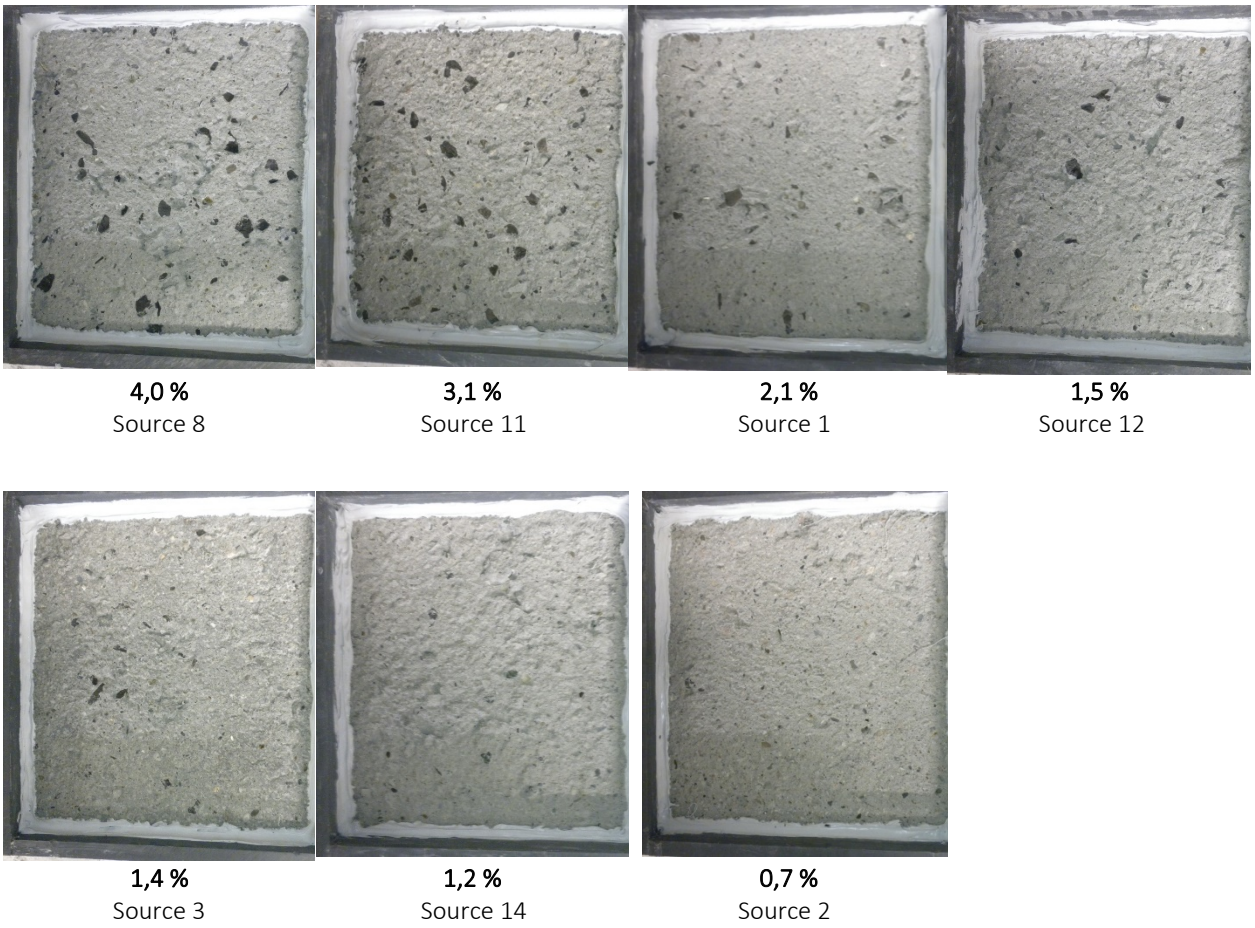


Figure 11.14 - Aspect visuel des plaques après 56 cycles de gel-dégel en fonction d'un classement par ordre décroissant du pourcentage de surface d'éclatement (plaques provenant du groupe de sept sources granulaires testées à l'Université de Sherbrooke).

Les surfaces les plus altérées ont été obtenues avec les sources 8 et 11. Les surfaces d'éclatement sont respectivement de 4,0% et 3,1%. De l'autre côté du spectre, les surfaces visuellement les plus saines ont été obtenues avec les sources 2, 14 et 3, soit respectivement 0,7%, 1,2% et 1,4% de surface d'éclatement. Les sources 1 et 12 ont des qualités esthétiques intermédiaires avec des surfaces d'éclatement de 1,5% et 2,1% respectivement. Le plus fort gradient visuel semble se produire entre les sources 1 et 11 (éclatements de 2,1% et 3,1%). Tout en reconnaissant que ce choix est subjectif, il est proposé de fixer le seuil visuel tolérable d'éclatements entre les sources 1 et 11. Cela correspondrait donc à une surface d'éclatements de 2,5%. Ce seuil n'est basé que sur la surface d'éclatement, car la surface de dégarnissement semble avoir beaucoup moins d'impact visuel sur la qualité esthétique des surfaces de béton.

11.3.4 Analyse globale de la surface d'éclatement en fonction des pertes aux essais de micro-Deval et de gel-dégel non confiné

Comme expliqué dans les paragraphes qui précèdent, la surface d'éclatement a été identifiée comme le paramètre le plus directement relié à la qualité esthétique des surfaces de bétons écaillées. Le seuil

maximal de 2,5% est proposé pour séparer les granulats durables à l'éclatement de ceux qui apparaissent non durables à l'éclatement (paragraphe 11.3.3).

La Figure 11.15 présente la relation générale entre la surface d'éclatement et la perte à l'essai de gel-dégel non-confiné pour toutes les sources granulaires. Les marqueurs noirs sont les résultats obtenus par l'Université de Sherbrooke (moyenne de six plaques) et les marqueurs blancs sont les résultats de l'Université Laval (moyenne de trois plaques). Les résultats des deux laboratoires sont cohérents car tous les points sont localisés à l'intérieur d'une même plage plus étirée qui montre une tendance à l'augmentation de la surface d'éclatement lorsque la perte à l'essai de gel-dégel non-confiné augmente. Cependant, pour un seuil d'éclatement de 2,5%, il n'est pas possible d'identifier une valeur de perte à l'essai de gel-dégel permettant de séparer les granulats durables à l'éclatement des granulats non durables.

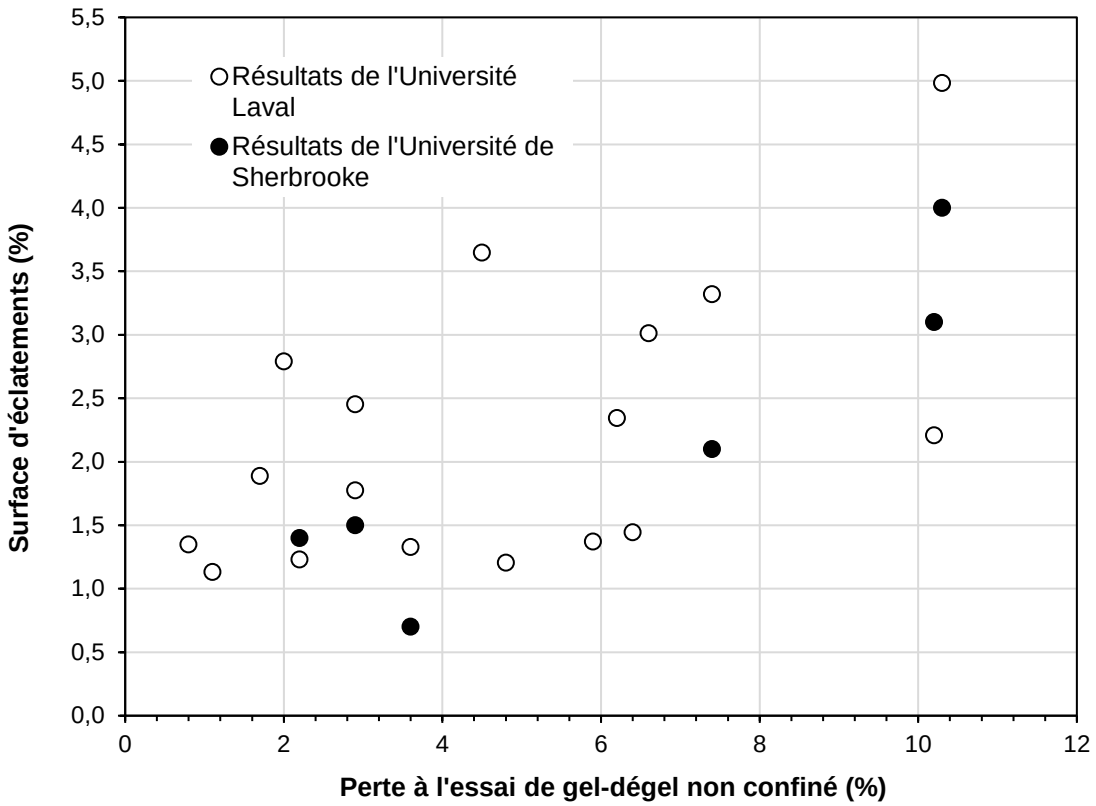


Figure 11.15 - Relation entre la surface d'éclatement et la perte à l'essai de gel-dégel non-confiné pour toutes les sources granulaires.

La Figure 11.16 présente la relation générale entre la surface d'éclatement et la perte à l'essai micro-Deval, pour toutes les sources granulaires. Les marqueurs noirs sont les résultats obtenus par l'Université de Sherbrooke et les marqueurs blancs sont ceux de l'Université Laval. Encore une fois, les résultats des deux laboratoires sont cohérents car tous les points sont localisés à l'intérieur de deux plages dont les frontières peuvent être associées à une valeur de surface d'éclatement et à une valeur de perte à l'essai micro-Deval.

Des granulats durables à l'éclatement peuvent être regroupés dans la boite localisée dans la partie inférieure dans la moitié gauche de la Figure 11.16. Cette région correspond à une surface d'éclatement maximale de 2,5% et une perte à l'essai micro-Deval inférieure à 15%. Des granulats dont la durabilité est

incertaine se retrouvent dans l'autre région localisée dans la moitié droite de la Figure 11.16. Cette région est définie par une perte à l'essai micro-Deval supérieure à 15%. La durabilité des granulats ayant une perte micro-Deval supérieure à 15% est incertaine car cette région regroupe des granulats durables avec une surface d'éclatement inférieure à 2,5%, mais aussi des granulats non durables puisqu'ils engendrent une surface d'éclatement supérieure à 2,5% et pouvant atteindre jusqu'à 5%. Globalement, ces résultats suggèrent que la perte à l'essai micro-Deval est un paramètre important mais non suffisant pour estimer à lui seul la susceptibilité à l'éclatement des gros granulats lors d'un essai d'écaillage.

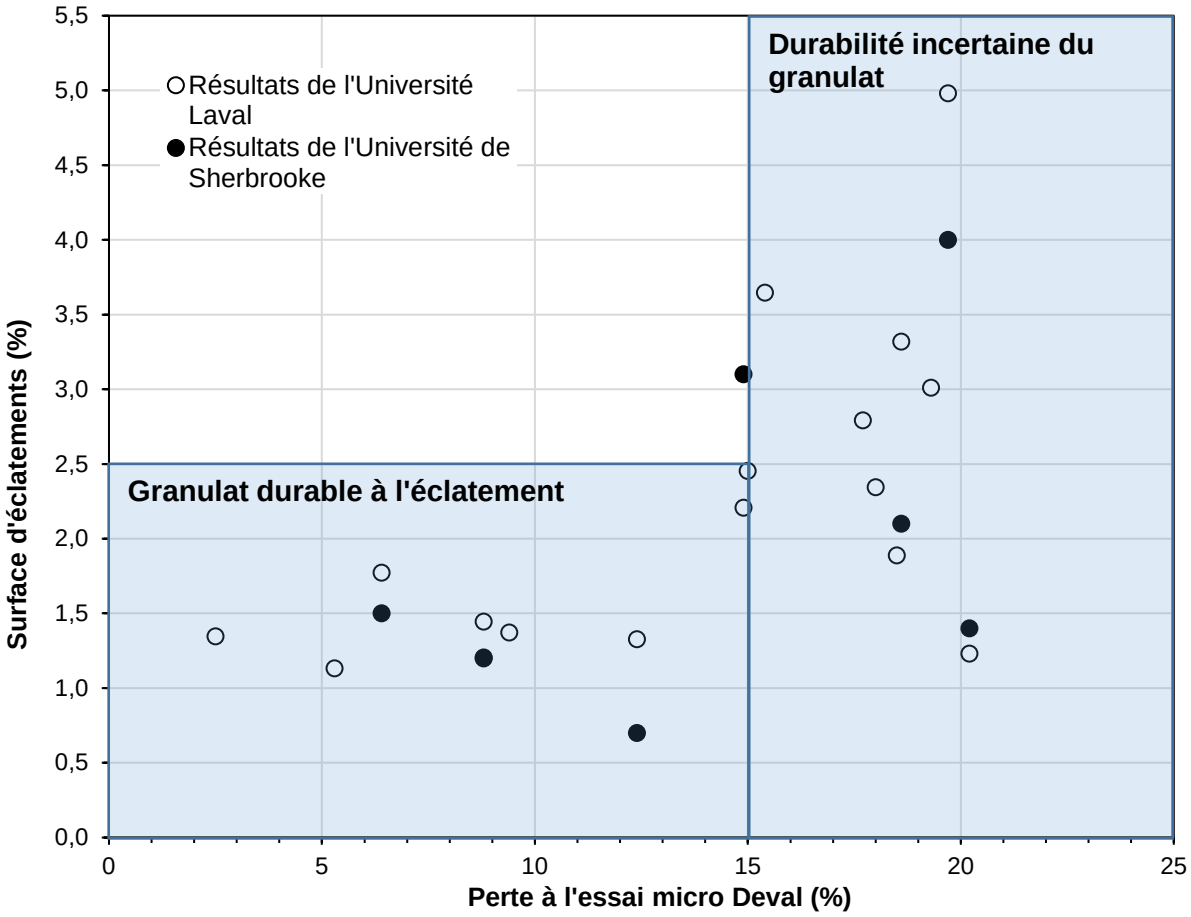


Figure 11.16 - Relation entre la surface d'éclatement et la perte à l'essai micro-Deval pour toutes les sources granulaires.

La Figure 11.17 présente la relation générale entre la surface d'éclatement et la somme des pertes aux essais micro-Deval et de gel-dégel non confiné, pour toutes les sources granulaires (résultats de l'Université de Sherbrooke et de l'Université Laval). De nouveau, les résultats des deux laboratoires sont cohérents car tous les points sont localisés à l'intérieur de trois plages dont les frontières peuvent être associées à une valeur de surface d'éclatement et à une valeur de la somme des pertes à l'essai micro-Deval et gel-dégel non-confiné.

Des granulats durables à l'éclatement peuvent être regroupés dans la boite localisée dans la partie inférieure gauche de la Figure 11.17. Cette région correspond à une surface d'éclatement maximale de 2,5% et une somme des pertes aux essais micro-Deval et de gel-dégel non confiné inférieure à 19%. Des granulats de durabilité incertaine se retrouvent dans une région centrale de la Figure 11.17. Cette région

est définie par une somme des pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné comprise entre 19% et 28%. Dans cette zone, la durabilité des granulats est incertaine car on y retrouve des granulats durables (surface d'éclatements inférieure à 2,5%), mais aussi non durables (surface d'éclatements supérieure à 2,5%). Une troisième zone localisée à droite de la Figure 11.17 regroupe un granulat (source 8) non durable à l'éclatement puisque la surface d'éclatement de plus de 4% est nettement supérieure au seuil maximal choisi de 2,5%. Comme dans le cas précédent, ces résultats suggèrent que la somme des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné est un paramètre important mais non suffisant ou totalement discriminatoire pour estimer la susceptibilité à l'éclatement des gros granulats lors d'un essai d'écaillage. Cependant, la somme des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné semble plus fiable que la seule perte à l'essai micro-Deval. En effet, la zone d'incertitude est moins vaste et il est possible d'identifier une deuxième zone de certitude correspondant à des granulats non durables. En pratique, on pourrait suggérer qu'un granulat dont la somme des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné est dans l'intervalle de 19% et 28% devrait démontrer sa durabilité à l'éclatement par un test d'écaillage comportant la mesure de la surface d'éclatement selon la procédure utilisée dans cette étude.

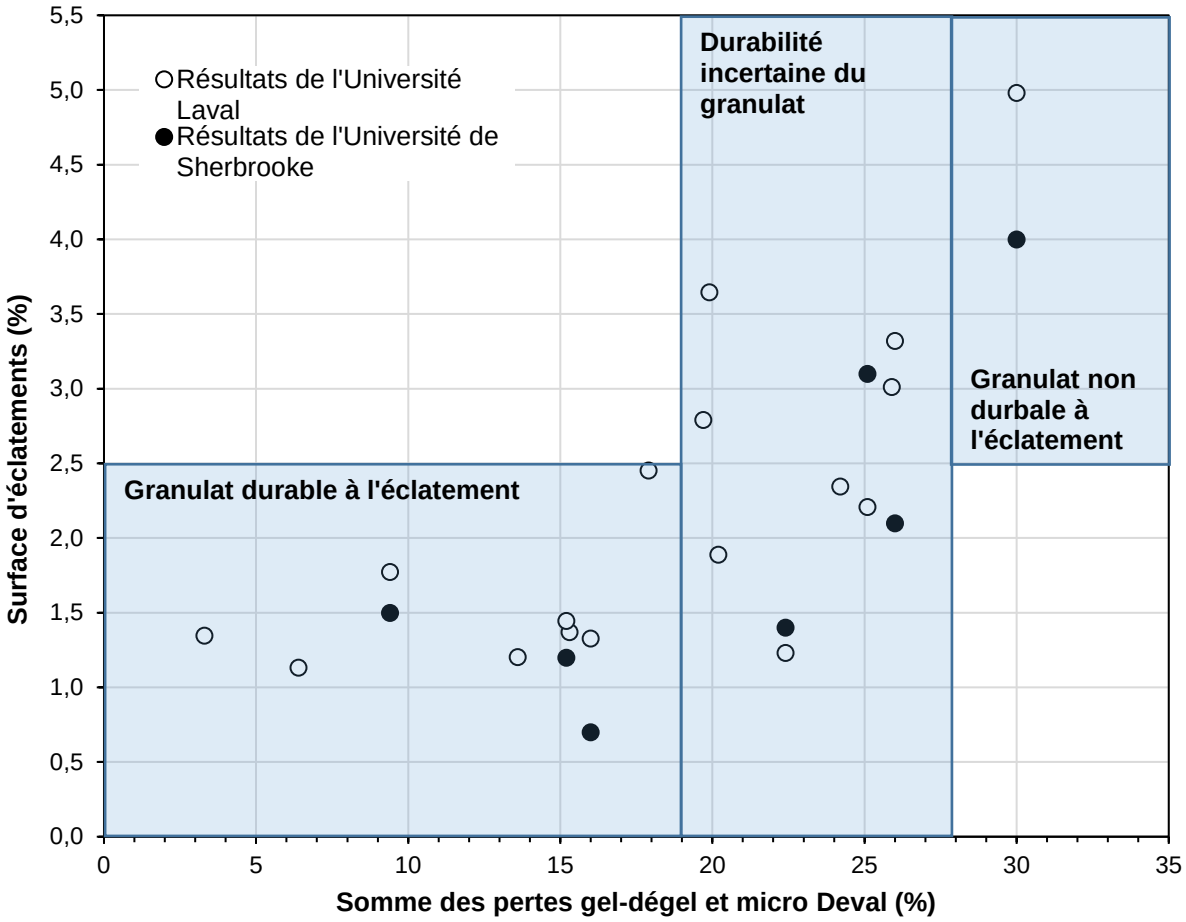


Figure 11.17 - Relation entre la surface d'éclatement et la somme des pertes aux essai micro-Deval et de gel-dégel non confiné, pour toutes les sources granulaires

11.3.5 Analyse de la surface d'éclatement en fonction des exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1

Le Tableau 12 de la norme CSA A23.1-2019 spécifie que les gros granulats utilisés dans les bétons exposés aux cycles de gel-dégel doivent avoir une perte micro-Deval maximale de 17% et une perte maximale à l'essai de gel-dégel non confiné de 6%. La Figure 11.18 présente les surfaces d'éclatements de sources granulaires dont les pertes micro-Deval et au gel-dégel non confiné sont conformes aux exigences du tableau 12 de la normes CSA A23.1-2019. Il s'agit des sources 2, 4, 5, 7, 12, 13, 15 et 17 identifiées en rouge sur la Figure 11.18 (les cylindres bleus sont les résultats de l'Université Laval et les cylindres gris sont ceux de l'Université de Sherbrooke). Sept des huit sources de ce groupe ont une surface d'éclatement inférieure au seuil de 2,5% proposé au paragraphe 11.3.3. Seule la source 13 dépasse ce seuil avec une surface d'éclatement de 3,65%. Ces résultats suggèrent que les exigences de base du Tableau 12 conduisent effectivement à une sélection de granulats produisant les plus faibles surfaces d'éclatements, avec 7 sources (sur les 8 dans cette catégorie, soit 88%) qui produisent une surface d'éclatement inférieure au seuil proposé de 2,5%. Seule la source 13 passe au travers du filtre avec une surface d'éclatement de 3,65%. On remarque que cette source est proche des deux limites maximales (gel-dégel = 4,5% et micro-Deval = 15,4%). Il est intéressant de noter que la somme des pertes donne 19,9%, ce qui positionne cette source dans la zone de durabilité incertaine proposée au paragraphe 11.3.4 (Figure 11.17).

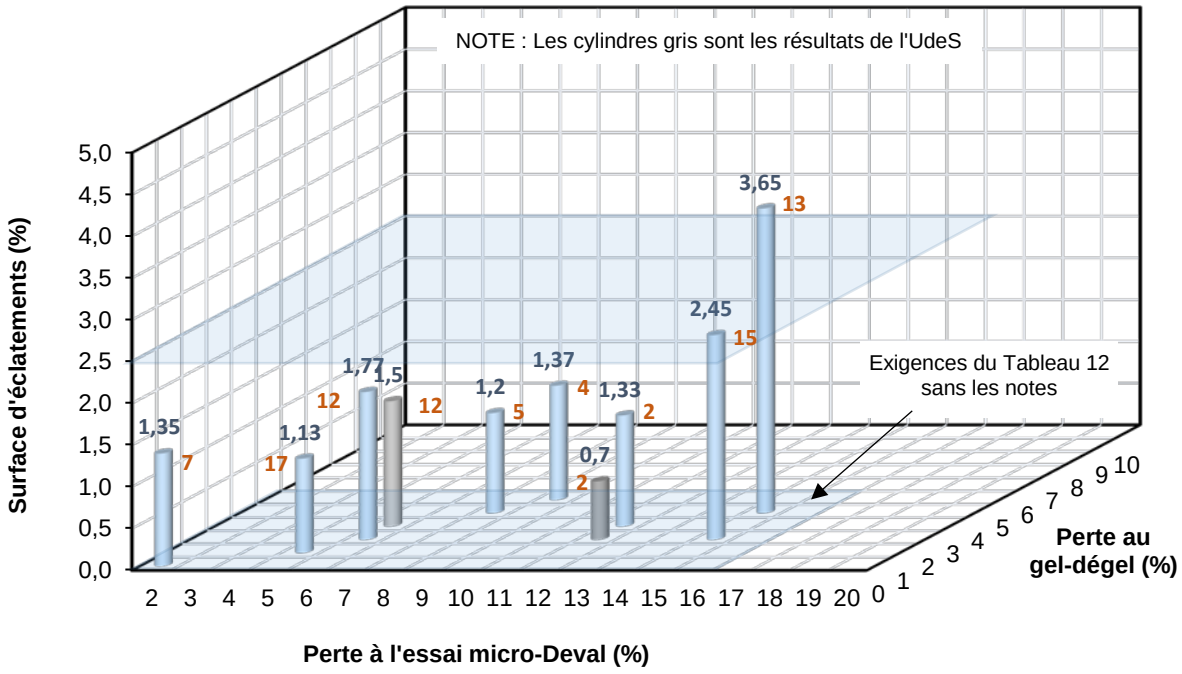


Figure 11.18 - Surfaces d'éclatement des sources granulaires qui sont conformes aux exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1

Les notes du Tableau 12 de la norme CSA A23.1 2019 indiquent que pour certains granulats, tels que les calcaires et les dolomies des Basses-terres du Saint-Laurent, on autorise une perte maximale micro-Deval

de 19% et une perte maximale au gel-dégel non-confiné de 9%. Cette zone de performance est illustrée à la Figure 11.19. Elle présente les surfaces d'éclatement de sources granulaires dont les pertes micro-Deval et au gel-dégel non confiné sont conformes aux notes du Tableau 12 de la norme CSA A23.1. Il s'agit des sources 1, 9, 10 et 14 identifiées en rouge sur la Figure 11.19. Il faut noter que les notes du Tableau 12 ne s'appliquent qu'aux sources de calcaires et de dolomies. Par conséquent, elles ne concernent pas les sources 9 et 14. Pour marquer cette exclusion, les cylindres des sources 9 et 14 ont été indiqués en blanc dans la Figure 11.19 (les cylindres jaunes sont les résultats de l'Université Laval et les cylindres gris sont ceux de l'Université de Sherbrooke).

Dans le cas spécifique des calcaires et des dolomies (sources 1 et 10), seule la source 1 dépasse le seuil maximal avec une surface d'éclatement de 3,32%. Il faut noter que les sources 1 et 10 ont une somme des pertes micro-Deval et gel-dégel de respectivement 26% et 20,2%. Elles sont donc dans la zone de durabilité incertaine définie à la Figure 11.17.

Dans le cas de la source 10, les notes permettent de l'inclure comme une source granulaire durable à l'éclatement. Seule la source 1 (3,32%) passe le filtre des notes du Tableau 12. Comme dans le cas des exigences de base du Tableau 12 (Figure 11.18), il y a donc toujours un risque qu'une source granulaire moins durables soit autorisée. Encore une fois, la source la moins performante (source 1) est celle qui est la plus proche des deux limites maximales autorisées (gel-dégel=7,4 et micro-Deval=18,6). La somme des pertes micro-Deval et gel-dégel de la source 1 est la plus élevée du groupe avec un total de 26%. Elle se positionne à la limite maximale de la zone de durabilité incertaine de la Figure 11.17. Ces résultats suggèrent que les notes du Tableau 12 semblent peu justifiées car elles incluent, à juste titre, la source 10 (durable), tout en incluant aussi une source non durable à l'éclatement (source 1).

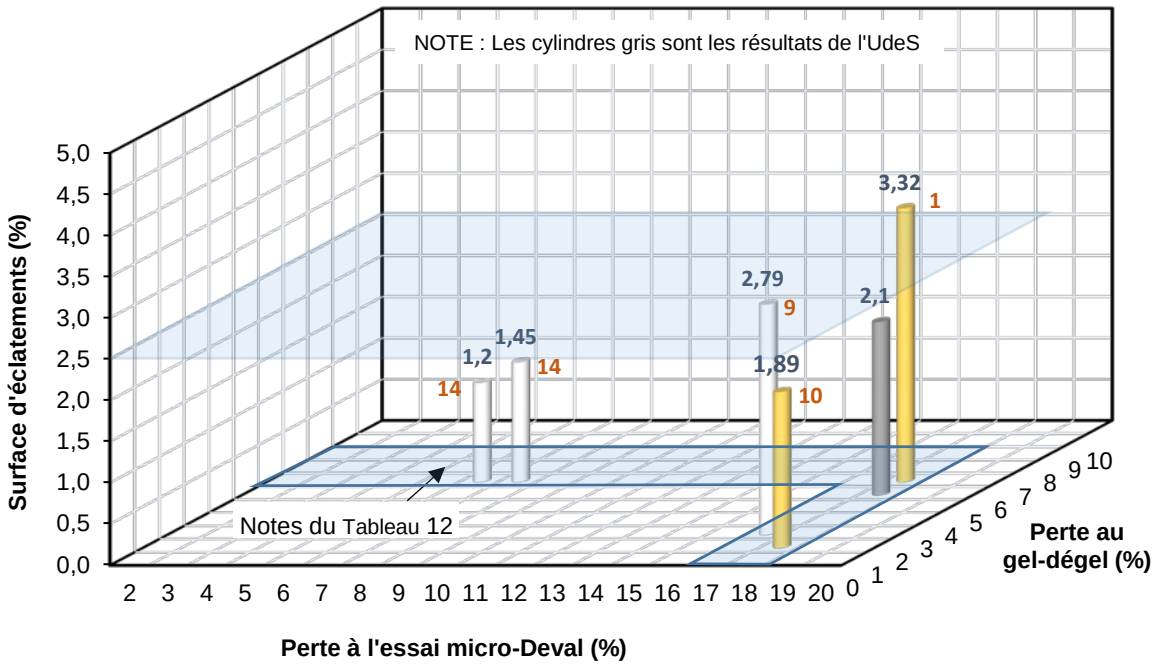


Figure 11.19 - Surfaces d'éclatement des sources granulaires qui sont conformes aux exigences des notes du Tableau 12 de la norme CSA A23.1-2019 (Note : les sources 9 et 14 ne sont pas un calcaire ni une dolomie, elles ne sont donc pas concernées par les notes du Tableau 12).

Dans le cas d'un béton exposé au gel-dégel, les exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1-2019 n'autorisent pas l'utilisation de sources granulaires avec une perte au gel-dégel supérieure à 9% ou avec une perte micro-Deval supérieure à 19%. Dans la Figure 11.20, cette zone est localisée au-delà (Nord-Est) de la zone des notes du Tableau 12. Elle inclut les sources granulaires 3, 6, 8, 11 et 16, indiquées en rouge.

Seulement deux des cinq sources de ce groupe ont des surfaces d'éclatements supérieures à 2,5%. Il s'agit des sources 16 (3,01%) et 8 (4,98%). Les trois autres sources (3, 6 et 11), qui ne sont pas conformes aux exigences du Tableau 12, ont néanmoins des surfaces d'éclatements inférieures au seuil proposé de 2,5%.

Toutes les sources de ce groupe ont une somme des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné élevée et comprise entre 22,4% et 30%. Les sources 3, 6, 11 et 16 sont dans la zone de durabilité incertaine définie à la Figure 11.17. La source 8 est dans la zone des granulats non durables. Sur la base du seuil maximal d'éclatement proposé de 2,5%, ces résultats montrent que les exigences du Tableau 12 peuvent donc exclure des sources granulaires potentiellement durables à l'éclatement. C'est notamment le cas des sources 3 et 6.

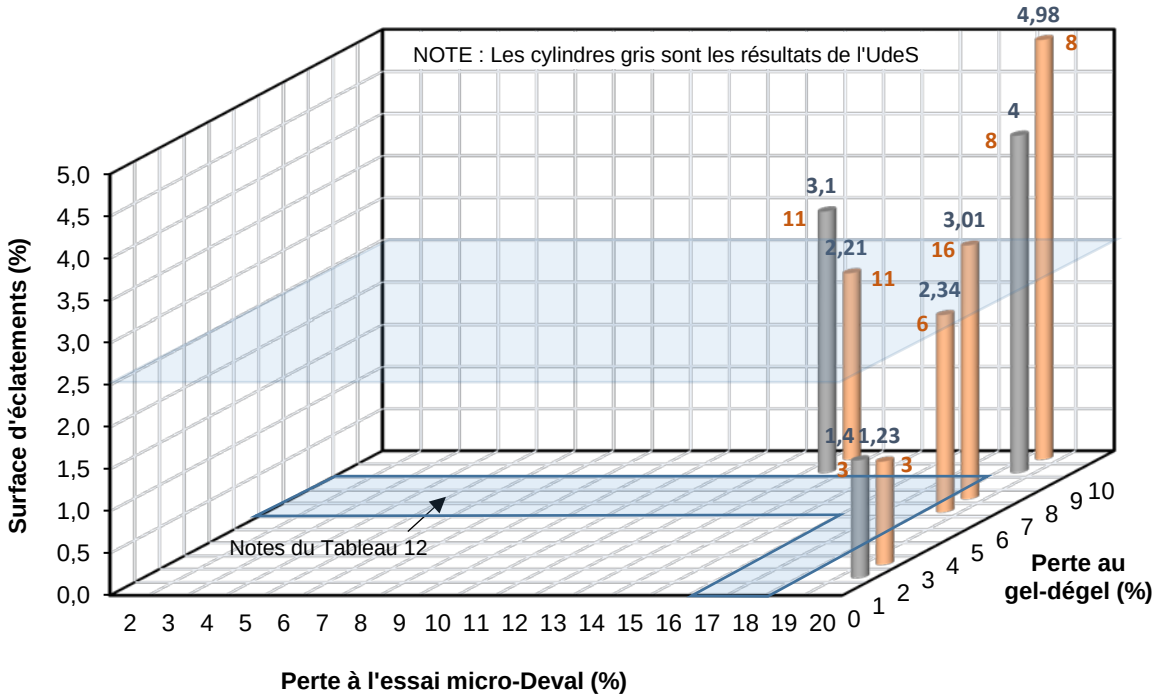


Figure 11.20 - Surfaces d'éclatement des sources granulaires qui ne sont pas conformes aux exigences des notes du Tableau 12 de la norme CSA A23.1

Cette analyse permet de proposer une nouvelle approche de spécification pour la sélection de sources granulaires durables à l'éclatement :

Exigences de base :

- Perte au gel-dégel non confiné ≤ 6% et perte à l'essai micro-Deval ≤ 17%
  - Sources 2, 4, 5, 7, 12, 15 et 17
    - Les mesures expérimentales confirment que ces sources ont des surfaces d'éclatements inférieures à 2,5%.
- Lorsqu'un de ces deux critères n'est pas respecté, alors la somme des pertes micro-Deval et gel-dégel doit être inférieure à 19%
  - Source 14 (gel-dégel non confiné: 6,4 > 5% - somme : 15,2 < 19%)
    - Les mesures expérimentales confirment que cette source a une surface d'éclatements inférieure à 2,5%.
- Une somme des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné supérieure à 19% n'est pas autorisée, même si les deux premiers critères sont respectés
  - Source 13 (19,9 > 19%)
    - Les mesures expérimentales confirment que cette source a une surface d'éclatements supérieure à 2,5%.

Test de laboratoire pour confirmer la durabilité à l'éclatement

- Les sources qui ne respectent pas les exigences de base et qui ont une somme des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné inférieure à 28% peuvent être utilisées à condition de démontrer, par un test de laboratoire, que la surface d'éclatement est inférieure ou égale à 2,5%.
  - Les sources 1, 3, 6, 10, 11, 13 et 16 sont dans ce cas de figure
    - Les sources 3, 6, 9, 10 et 11 ont démontré leur durabilité en laboratoire
    - Les sources 1, 9, 13 et 16 n'ont pas démontré leur durabilité en laboratoire (3,32%, 2,79%, 3,65% et 3,01%)

Les sources dont la somme des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné est supérieure à 28% ne doivent pas être utilisées dans les bétons exposés à des cycles de gel-dégel en présence de sels fondants et pour lesquels on souhaite minimiser les éclatements de la surface exposée.

- La source 8 est dans ce cas de figure
  - La surface d'éclatement est de 4,98%

Le Tableau 11.2 résume le classement des sources selon les critères proposés. Sur les 17 sources granulaires testées, cinq ne devraient pas être utilisées dans des bétons exposés à des conditions pouvant causer un écaillage, et notamment lorsque la qualité esthétique des surfaces doit être prise en compte.

Tableau 11.2- Résumé du classement des sources granulaires selon les critères proposés

Exigence de base		Test de durabilité en laboratoire			Exclusion	
Source	Surface d'éclatement (%)	Source	Surface d'éclatement (%)	Conformité du résultat du test	Source	Surface d'éclatement (%)
2	1,33	3	1,23	Oui	8	4,98
4	1,37	6	2,34	Oui		
5	1,20	10	1,89	Oui		
7	1,35	11	2,21	Oui		
12	1,77					
15	2,45	1	3,32	Non		
17	1,13	9	2,79	Non		
14	1,45	13	3,65	Non		
		16	3,01	Non		

11.4 Influence de la composition des granulats sur le développement des éclatements

Tel que mentionné au Chapitre 5, les 17 matériaux granulaires sélectionnés pour ce projet ont fait l'objet d'une analyse pétrographique détaillée. Ces travaux avaient pour objectif d'identifier les principaux faciès constituant les matériaux granulaires, d'en estimer la qualité physico-mécanique et ultimement d'en déterminer le Nombre Pétrographique (NP) selon la méthode décrite dans la norme CSA A23.2-15A (2019).

Le Tableau 11.3 présente les principaux faciès identifiés par les deux pétrographes ayant réalisé l'examen pétrographique des granulats en question. Les types de matériaux granulaires qui montrent un potentiel d'engendrer des éclatements lorsqu'utilisés comme granulats d'un béton soumis à des cycles de gel-dégel sont des matériaux poreux, altérés, possédant une certaine « structure » (telle que litage/schistosité) ou qui contiennent des minéraux/lits/plaquages argileux ou du shale. Ces matériaux sont identifiés en rouge dans les descriptions pétrographiques du Tableau 11.3. Lors de la détermination du NP, ces types de roches sont généralement identifiées avec une qualité « médiocre ou nuisible ». Un facteur multiplicateur de 6 et 10 leur est alors attribué, respectivement, contribuant ainsi à augmenter la valeur du NP dont l'ampleur sera fonction de leur proportion dans le matériau granulaire. Le pourcentage de particules de qualité médiocre ou nuisible, de même que le NP sont indiqués dans le Tableau 11.3. Il est important de mentionner que ces valeurs montrent une certaine variation attendue puisqu'il s'agit d'une méthode plutôt subjective et liée à l'expérience des pétrographes impliqués.

Les résultats présentés au Tableau 11.3 confirment qu'un pourcentage élevé de particules médiocres/nuisibles au sein du matériau granulaire résultent en un NP plus élevé. C'est le cas par exemple du granulat de la source 1 (moyenne de 6,7% de particules médiocres/nuisibles et NP moyen de 146), ou du granulat de la source 8 (moyenne de 8,7% de particules médiocres/nuisibles et NP moyen de 149). Dans les deux cas, les particules impliquées sont des calcaires avec plaquage argileux et calcaires argileux.

Tableau 11.3. - Principaux faciès présents dans les matériaux granulaires utilisés dans ce projet. Les cellules colorées correspondent à des calcaires et dolomies. Les types de roches susceptibles d'engendrer des éclatements lors de cycles de gel-dégel, de même que le pourcentage de particules médiocres ou nuisibles sont identifiés en rouge pour chacune des descriptions pétrographiques. Les valeurs aux essais micro-Deval (NP) et gel-dégel non confiné (GDNC) sont également incluses pour chaque matériau granulaire.

Source	Labo	Principaux faciès	Nombre pétrographique		% particules médiocres ou nuisibles		MD	GDNC
1	3	calcaire à grains fins, calcaire cristallins fossilifères, calcaire à plaquage argileux, shale calcareux et calcaire argileux	145	146	7,2	6,7	18,6	7,4
	4	calcaire à grains fins, calcaire fossilifère, calcaire à plaquage argileux, shale calcareux et calcaire avec sulfures oxydés	146		6,2			
2	3	granite, monzonite, syénite à quartz, gabbro, diorite	124	130	0,2	0,1	12,4	3,6
	4	granite, granite altéré, granodiorite et syénite	136		0			
3	3	calcaire cristallin fossilifère, moindre proportion de calcaire fossilifère à grains fins; quelques particules avec un plaquage argileux mince à grossier	122	118	1,4	1,3	20,2	2,2
	4	calcaire à grains fins gris-foncé, du calcaire fossilifère à grains moyens de couleur beige, et du calcaire argileux / avec placage argileux, calcaire avec sulfures oxydés	113		1,2			
4	3	basaltes dont certaines particules avec amygdales ou veinules remplies de calcite	101	104	0	0	9,4	5,9
	4	variétés de basalte (amygdalaire, à veines de calcite, noir, rouge, vert altéré) et veines de calcite	106		0			
5	3	dolomie dure à grains fins et dolomie cristalline; certaines particules avec plaquage argileux mince	105	109	0,3	0,8	8,8	4,8
	4	dolomie à grains fins, dolomie cristalline, dolomie à grains moyens, dolomie contenant des traces de sulfures de fer rouillés, dolomie à veines de calcite et dolomie argileuse / avec placage argileux	112		1,2			
6	3	calcaire cristallin fossilifère, calcaire cristallin avec horizons de grains fins et calcaire à grains fins; certaines particules avec plaquages argileux minces à épais	129	127	3,9	3,2	18,0	6,2
	4	calcaire fossilifère, calcaire fin, calcaire avec sulfures de fer oxydés, calcaire argileux / avec placage argileux et shale	124		2,7			
7	3	phonolite plus ou moins foncée, basalte	100	104	0	0	2,5	0,8
	4	phonolite plus ou moins foncée, basalte et phonolite avec sulfures oxydés	107		0			
8	3	calcaire fossilifère à grains fins, calcaire argileux et calcaire cristallin; rares particules de basalte	152	149	7,1	8,7	19,7	10,3
	4	calcaire à grains fins, calcaire argileux, calcaire fossilifère, calcaire avec sulfures oxydés, calcaires avec plaquage argileux, basalte	146		10,3			

Source	Labo	Principaux faciès	Nombre pétrographique		% particules médiocres ou nuisibles		MD	GDNC
9	3	schiste à séricite et chlorite (verdâtre), schiste à séricite (teinte beige ou bleuté), particules quartziques avec chlorite, quartzites	139	149	4,3	5,7	17,7	2,0
	4	schiste vert (séricite/chlorite), schiste gris, quartzite et veines de quartz, particules avec sulfures oxydés	159		7,1			
10	3	calcaire avec horizon de calcite, calcaire siliceux dur à grains fins, calcaire altéré, calcaire argileux.	121	124	1,9	2,1	18,5	1,7
	4	calcaire fin, calcaire cristallin/ fossilifère, calcaire avec veine de calcite, veines de calcite, calcaire argileux/avec plaque argileux et shale	126		2,3			
11	3	calcaire cristallin fossilifère, calcaire à grains fins fossilifères et calcaire micritique calcaire argileux	137	137	3,8	3,0	14,9	10,2
	4	calcaire à grains fins, calcaire cristallin, calcaire fossilifère, calcaire avec sulfures oxydés et calcaire argileux	136		2,2			
12	3	dolomie dure à grains fins, quelques dolomies à plaquage argileux fin, traces de dolomie argileuse	112	116	0,3	1,1	5,4	4,0
	4	dolomie gris clair à gris-foncé, dolomie argileuse/avec placage argileux, dolomie oxydée, dolomie avec veines de calcite/dolomite	120		1,9			
13	3	calcaire fossilifère, calcaire à grains fins, dolomie, calcaire micritique et calcaire argileux	118	120	2,1	2,0	15,4	4,5
	4	calcaire fin, calcaire cristallin, calcaire fossilifère, calcaire argileux, calcaire avec sulfures oxydés, veines de calcite et dolomie	121		1,9			
14	3	basalte de couleur vert à rougeâtre; basalte régulièrement fracturé et fractures remplies de calcite	103	102	0	0	8,8	6,4
	4	brèche volcanique, basalte vert, du basalte rouge, basalte rouge avec veines de calcite et basalte vert avec veines de calcite	101		0			
15	3	grès dur à grains moyens, grès dur à grains fins et mudrock plus ou moins lité, particules indifférenciées très altérées	111	117	1,4	0,7	15,0	2,9
	4	grès dur à grains fins et moyens (parfois avec traces d'oxydation), grès avec veines de calcite, mudrock gris à noir (parfois avec traces d'oxydation)	123		0			
16	3	calcaire cristallin fossilifères, calcaire altéré, calcaire à grains fins et, en moindre proportion, calcaire à plaquage argileux et calcaires argileux	118	121	3,3	3,2	19,3	6,6
	4	calcaire cristallin, calcaire fossilifère, calcaire à grains fins, calcaire argileux avec plaquage argileux, calcaire avec sulfures oxydés et shale	123		3,0			
17	3	grès de type quartz-arénite; certaines particules avec lentilles remplies de particules argileuses (traces)	105	114	0	0	5,3	1,1
	4	grès, grès quartzitique, grès avec sulfures de fer et grès avec des veines de calcite	123		0			

Les figures 11.21A à 11.21D mettent en relation les valeurs de NP (valeurs obtenues par les deux pétrographes) et le pourcentage de surface d'éclatement obtenu lors de l'essai d'écaillage; les figures 11.21A et 11.21B regroupent les résultats pour l'ensemble des matériaux granulaires étudiés (i.e. tous les types de roches confondus), alors que les figures 11.21C et 11.21D présentent les résultats pour les calcaires/dolomies seulement. Des boites sont incluses sur ces figures afin de regrouper les résultats selon des classes de NP. Les résultats de la Figure 11.21 indiquent que les granulats avec un NP inférieur à 110 offrent systématiquement une surface d'éclatements inférieure à 2,0% (un NP inférieur à 115 semble offrir des surfaces d'éclatement inférieures à 2,5%). Par contre, une zone « grise » est obtenue pour des valeurs de NP variant entre 110 et 140/150, i.e. où des surfaces d'éclatements variant entre 0,5 et 5% sont retrouvées. On remarque toutefois que dans le cas spécifique des calcaires/dolomies (Figure 11.21D), une valeur de NP supérieure à 125 regroupe la grande majorité des matériaux granulaires engendrant des surfaces d'éclatements supérieures à environ 2% (figure 11.21d); il est intéressant de constater que cette valeur-limite NP = 125 correspond à celle proposée pour les granulats acceptables pour les bétons de catégorie C1, C2, F1, C-XL, A-XL, A1 et A2 selon la norme CSA A23.2-15A (2019) (Tableau 11.4).

Tableau 11.4 - Limites suggérées du Nombre Pétrographique (NP) pour les catégories de qualité des granulats (selon la norme CSA A23.2-15A-2019).

Type de produit	Limite du NP, max.
Catégories de béton C1, C2, F1, C-XL, A-XL, A-1, A-2	125
Autres catégories de béton	140
Béton projeté	125
Ballast ferroviaire	125
Base granulaire	150
Sous-fondation granulaire de sélection	160

La Note 3 sous le Tableau 12 de la norme CSA A23.1 (2019) indique que pour certains granulats, tels que le calcaire et les dolomies des Basses-terres du Saint-Laurent au Québec, la limite de 19 plutôt que 17 à l'essai micro-Deval s'est avérée satisfaisante pour les classes d'exposition F-1, C-XL, A-XL, C-1 et C-2 (voir l'article 10.3 de CSA A23.2-30A). Ces limites plus élevées seront acceptées seulement si les producteurs de granulats sont aptes à démontrer que la production annuelle présente moins de 2,0 % de matériaux médiocres ou nuisibles, selon la détermination de CSA A23.2-15A. Il est intéressant de constater, à la Figure 11.22, que les calcaires/dolomies montrant un % de particules médiocres ou nuisibles inférieur à 2% ont engendré un pourcentage de surface d'éclatements inférieur à 2%. Il est à noter que dans ce groupe, seuls les trois granulats suivants sont touchés par la Note 3 ci-dessus :

- Source 1; MD = 18,6 (i.e. entre 17 et 19); % moyen de particules médiocres/nuisibles = 6,7%; % de surface d'éclatements de 3,32%. Donc, extension au micro-Deval non applicable car % de particules médiocres/nuisibles > 2% → conforme avec la valeur élevée de % d'éclatements (3,32%).
- Source 6; MD = 18,0 (i.e. entre 17 et 19); % moyen de particules médiocres/nuisibles = 3,2%; % de surface d'éclatements de 2,35%. Donc, extension au micro-Deval non applicable car % de particules médiocres/nuisibles > 2% - conforme avec la valeur élevée de % d'éclatements si utilise une valeur limite de 2% (2,35%).
- Source 10; MD = 18,5 (i.e. entre 17 et 19); % moyen de particules médiocres/nuisibles = 2,1%; % de surface d'éclatements de 1,89%. Donc, extension au micro-Deval applicable car % de particules médiocres/nuisibles < 2% - conforme avec la valeur de % d'éclatements < 2% (si utilise une valeur limite de 2%).

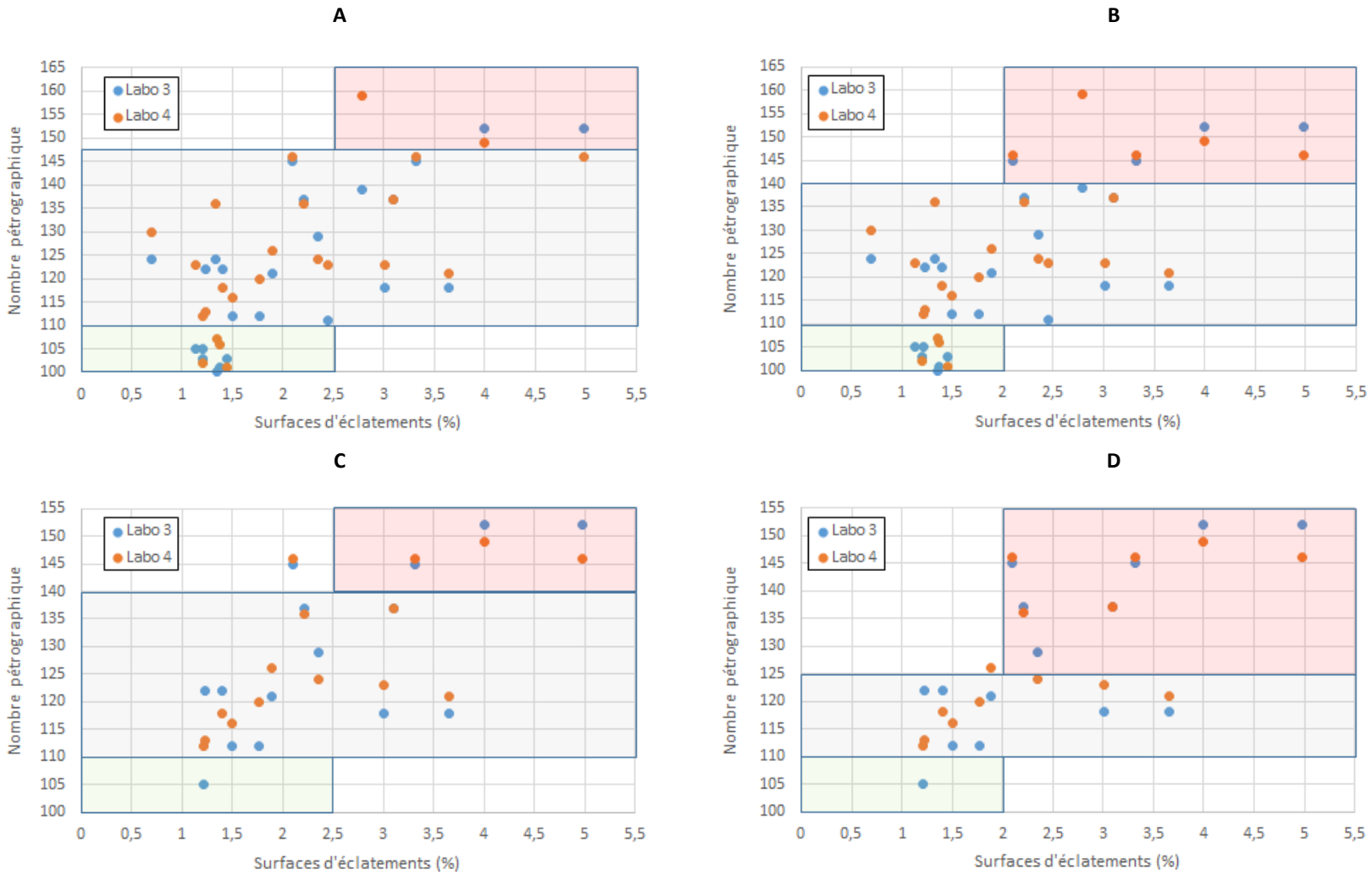


Figure 11.21 - Comparaison entre les valeurs du Nombre pétrographique (NP) obtenues selon la méthode décrite dans la norme CSA A23.2-15A (2019) et les surfaces d'éclatements déterminées lors de l'essai d'écaillage. A & B. Tous les granulats étudiés avec une valeur limite de surface d'éclatements de 2,5% (A) ou 2,0% (B). C & D. Granulats de types calcaires/dolomies avec une valeur limite de surface d'éclatements de 2,5% (C) ou 2,0% (D).

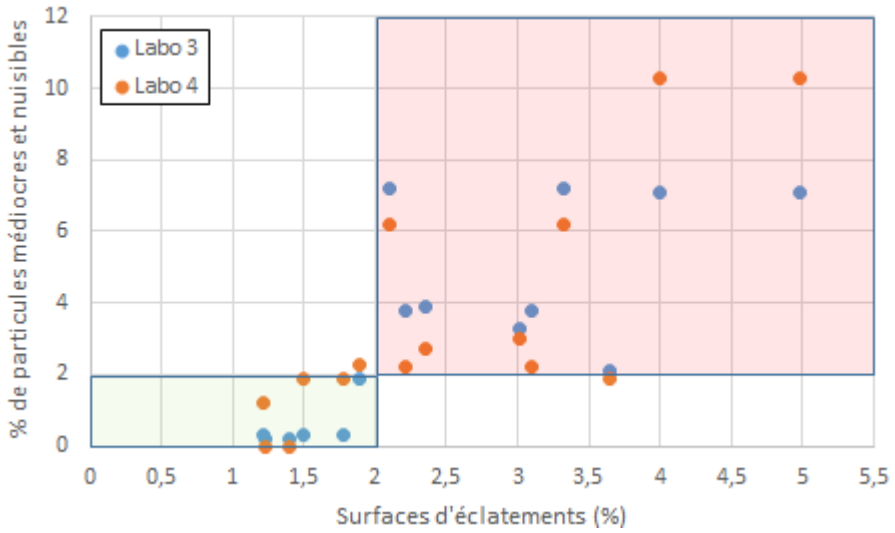


Figure 11.22 - Comparaison entre le pourcentage de particules médiocres/nuisibles au sein des matériaux granulaires de type calcaire/dolomie et % de surface d'éclatements obtenu à l'essai d'écaillage.

Le point « i » sous le tableau 12 de la norme CSA A23.1 (2019) indique que … *les exigences de résistance au gel- dégel du gros granulat doivent être omises, dans la mesure où le matériau satisfait aux autres exigences de perte à l'essai $MgSO_4$ indiquées à ce tableau.* Les résultats présentés à la figure 11.15 ont indiqué que, pour un seuil d'éclatement de 2,5% (ou 2,0%), il n'est pas possible d'identifier une valeur de perte à l'essai de gel-dégel permettant de séparer les granulats durables à l'éclatement des granulats non durables. Or, après vérification, aucune relation n'a pu être établi entre la perte à l'essai $MgSO_4$ et le % d'éclatement mesuré lors de l'essai d'écaillage, ce qui indique que l'essai $MgSO_4$ ne permet pas de remplacer l'essai de gel-dégel non-confiné à tout le moins pour évaluer la susceptibilité des granulats à générer des éclatements.

Après vérification, il est également possible de confirmer qu'aucune relation n'a pu être établie entre le pourcentage d'absorption des granulats, tel que mesuré lors de l'essai CSA A23.2-12A (2019), et le % d'éclatement mesuré lors de l'essai d'écaillage.

11.5 Influence de la dimension maximale du gros granulat sur la durabilité à l'écaillage

L'influence de la dimension maximale du gros granulat sur la résistance à l'écaillage a fait l'objet de la phase 2. Les bétons de la phase 1, produits avec les granulats provenant des sources 1, 3, 8 et 11, ont été reproduits, mais cette fois en utilisant un gros granulat de calibre 5 - 14 mm. Les résultats des essais d'écaillage des phases 1 et 2 sont illustrés à la Figure 11.23 et mettent en évidence l'influence de la dimension maximale du gros granulat sur les pertes massiques après 56 cycles de gel-dégel.

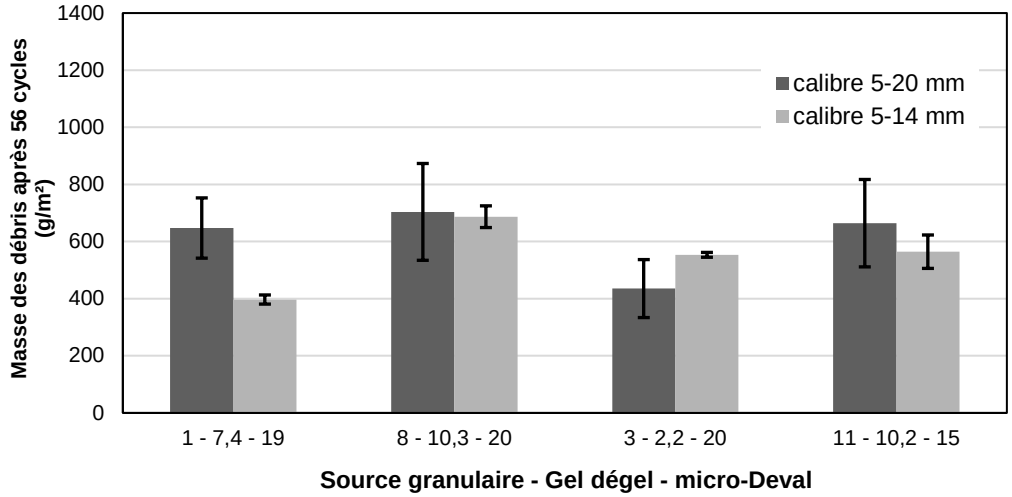


Figure 11.23 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et du calibre du gros granulat.

Les résultats de la Figure 11.23 montrent qu'il n'y a pas de tendance nette entre la dimension maximale du gros granulat et la masse des débris après 56 cycles. En effet, pour les sources 1 et 11, une diminution des pertes à l'écaillage est obtenue avec le calibre 5 - 14 mm. Il n'y a pas d'influence pour la source 8, alors que pour la source 3, le calibre 5 - 14 mm engendre une augmentation de la masse des débris. Globalement, à partir de ces résultats, il n'est pas possible de conclure sur une influence systématique du calibre du gros granulat sur la masse des débris lors de l'essai d'écaillage. Ce résultat semble logique, car si le calibre du granulat est modifié, cela n'a pas d'impact direct sur la qualité de la pâte de ciment, principale source des débris dus à l'écaillage.

Les histogrammes des Figures 11.24 et 11.25 montrent l'influence du calibre du gros granulat sur la surface dégarnie (Figure 11.24) et sur la surface éclatée (Figure 11.25). À l'exception de la source 3, les dégarnissements sont fortement diminués suite à la diminution de la dimension maximale du gros granulat (de 55 à 78 % de surface en moins). À l'inverse, dans le cas de la source 3, une augmentation de 28% des dégarnissements est observée pour le gros granulat de calibre 5-20 mm. Il est donc difficile de conclure sur une influence de la dimension maximale du granulat sur sa susceptibilité au dégarnissement. Globalement, les résultats suggèrent que diminuer le calibre du gros granulat permet de minimiser les risques de dégarnissement. Cependant, le cas particulier de la source 3 montre qu'il n'y a pas d'effet systématique. Le plus fort dégarnissement du calibre 5 - 14 mm de la source 3 pourrait résulter de la plus faible propreté de cette pierre. L'essai de particules fines passant le tamis de 80 µm présente en effet une valeur supérieure (2 %) à l'exigence de la norme CSA A23.1 de 1 %. Les poussières de concassage à la surface des particules pourraient contribuer à diminuer l'adhérence avec la pâte de ciment.

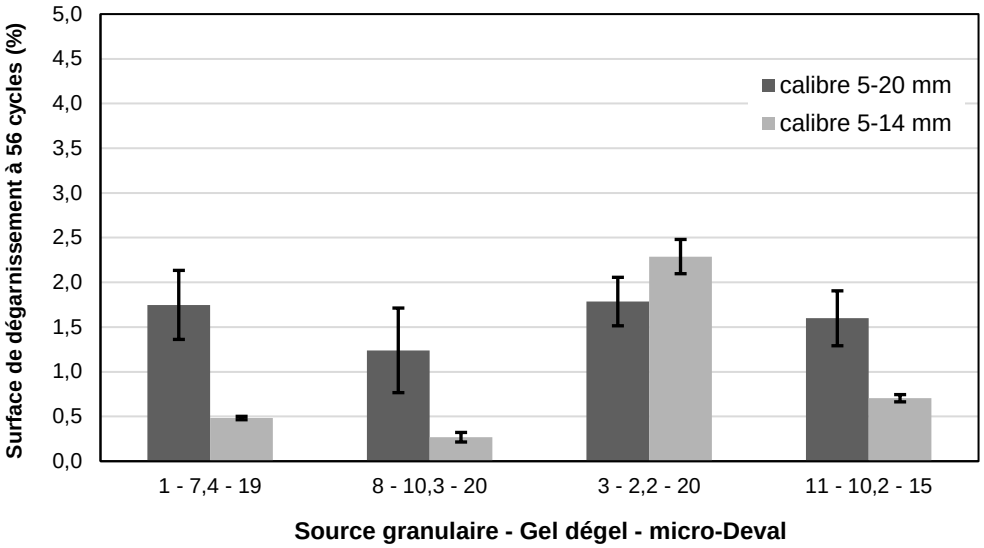


Figure 11.24 - Surface de dégarnissement en fonction de la source granulaire et du calibre du gros granulat.

La Figure 11.24 présente la surface d'éclatement en fonction de la source granulaire et du calibre du gros granulat. Compte tenu des barres de dispersion, il n'est pas possible de conclure sur une influence du calibre du gros granulat sur l'intensité de la surface des éclatements. En effet, pour les deux sources de catégories 3 (1 et 8), le calibre 5 - 14 mm produit une légère augmentation des éclatements. C'est l'effet inverse qui est constaté pour les deux sources de la catégorie 2 (3 et 11).

Globalement, il est difficile de tirer une conclusion claire sur l'effet du calibre du gros granulat sur l'intensité des dégarnissements et des éclatements. Néanmoins, les résultats suggèrent que l'utilisation d'un calibre granulaire plus petit (5 - 14 mm) pourrait contribuer à diminuer la susceptibilité au dégarnissement de certains granulats (sources 1, 8 et 11). Dans le cas des éclatements, la diminution du calibre ne semble pas avoir d'effet évident.

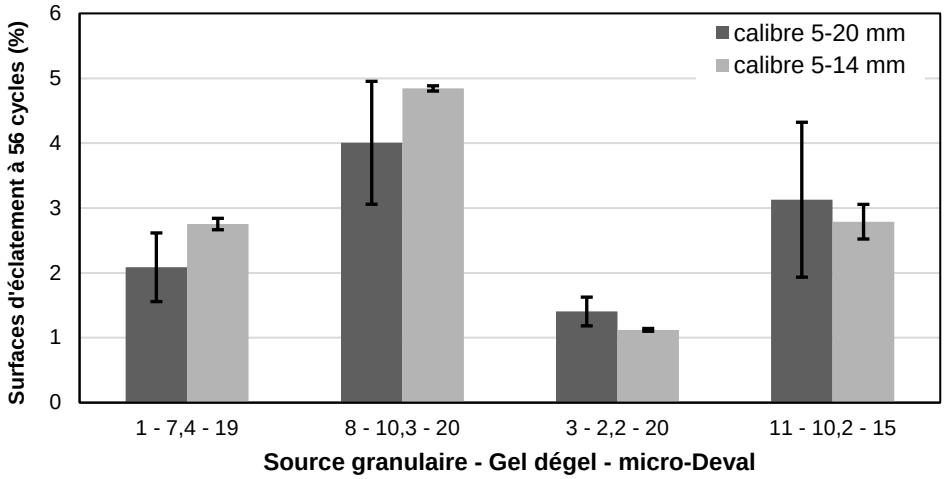


Figure 11.25 - Surface d'éclatement en fonction de la source granulaire et du calibre du gros granulat.

11.6 Influence de la qualité de la matrice cimentaire (Type XIII - Type F2 - Type V-S)

Cette partie a pour but de mieux comprendre l'influence de la qualité de la matrice cimentaire sur la durabilité à l'écaillage et la susceptibilité des granulats à éclater ou/et dégarnir. Cette partie regroupe les résultats des travaux réalisés lors des phases 1, 3 et 4 pour les bétons produits avec les granulats provenant des sources 1 et 8 (matrice Type XIII - phase 3, matrice Type V-S - phase 1 et matrice Type F2 - phase 4).

La Figure 11.26 illustre l'influence du type de matrice cimentaire et de la source granulaire sur la masse des débris après 56 cycles d'essai d'écaillage. Les résultats montrent un fort impact de la matrice cimentaire sur la durabilité à l'écaillage. En effet, que ce soit pour la source 1 ou la source 8, une matrice de qualité supérieure (Type XIII) permet de diminuer les débris massiques en dessous de la limite maximale de 500 g/m². À l'inverse, l'utilisation d'une matrice cimentaire de qualité inférieure (Type F2) engendre la plus forte masse de débris (jusqu'à 1200 g/m²). Par rapport à la matrice de Type V-S, la matrice de Type XIII a permis de diminuer de moitié la masse des débris, alors que la matrice de Type F2 les a augmentés de 72 %. Ces résultats étaient prévisibles puisqu'il est bien démontré que la durabilité à l'écaillage des bétons à haute performance (Type XIII) est nettement meilleure que celle d'un béton conventionnel. Dans le cas de la matrice Type F2, la durabilité à l'écaillage est très faible car ce type de béton n'est pas conçu pour une exposition sévère aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déglaçage.

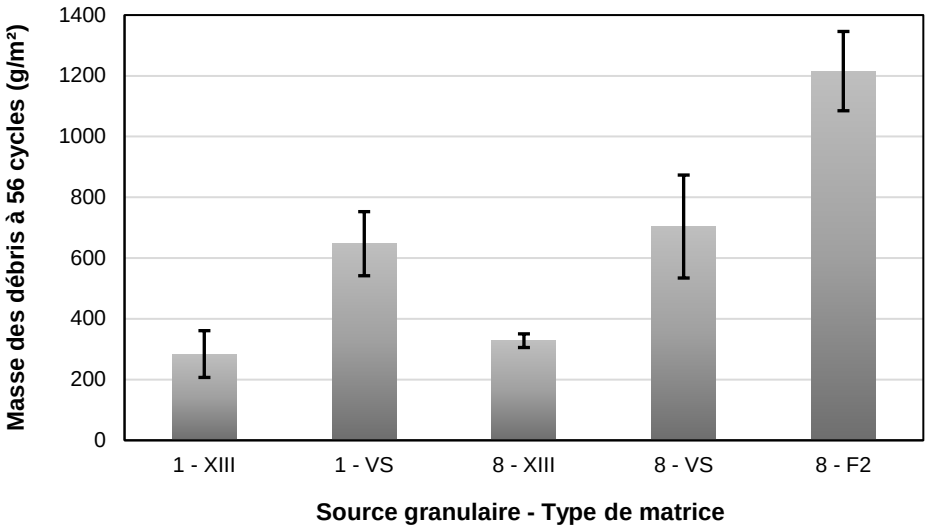


Figure 11.26 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et de la qualité de la matrice cimentaire.

Les Figures 11.27 et 11.28 présentent l'influence du type de matrice cimentaire et de la source granulaire sur l'intensité des dégarnissements (Figure 11.27) et des éclatements (Figure 11.28). Il faut rappeler que les sources granulaires 1 et 8 font partie de la catégorie des sources moins performantes. Les résultats de la Figure 11.27 démontrent qu'une matrice haute performance (Type XIII), améliore nettement la performance au dégarnissement des gros granulats dans la catégorie la moins performante (sources 1 et 8). Une partie de cette réduction des dégarnissements pourrait provenir également du calibre des granulats comme indiqué au paragraphe précédent pour les sources 1 et 8. En effet, le béton de Type XIII utilise des granulats de 5-14 mm alors que les bétons de Types V-S et F2 comportent des granulats de 5-

20 mm. Cette matrice, plus adhérente et plus imperméable, peut offrir une meilleure protection contre la saturation et la pénétration des ions chlores dans la porosité des particules de gros granulats. À l'inverse, la protection de la matrice Type F2, très perméable, est nettement moins efficace que celle de la matrice intermédiaire de Type V-S. L'influence protectrice d'une matrice cimentaire plus performante découle probablement d'une interface pâte-granulat plus compacte qui adhère plus fortement à la surface du granulat et qui le protège davantage contre la saturation de sa porosité interne.

Les résultats de la Figure 11.28 montrent qu'une matrice à haute performance (Type XIII) a aussi un effet favorable sur la susceptibilité à l'éclatement de sources granulaires de plus faible performance (1 et 8). L'effet est cependant moins net que dans le cas des dégarnissements. La surface moyenne d'éclatement de la matrice Type F2 est supérieure à celle de la matrice intermédiaire (Type V-S). Mais les barres de dispersion des résultats se chevauchent. Il n'est donc pas possible de confirmer que la matrice Type F2 est plus défavorable que la matrice Type V-S dans le cas des éclatements.

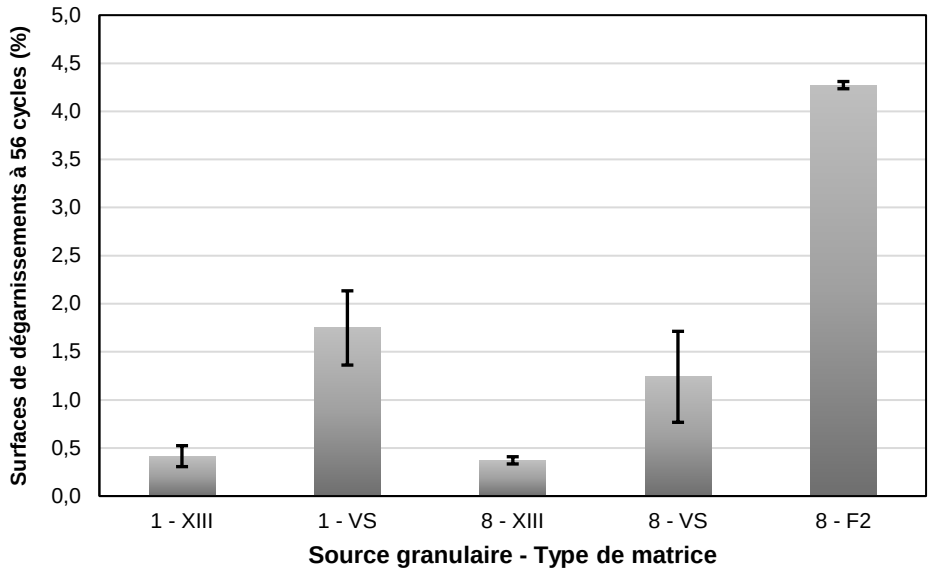


Figure 11.27 - Surfaces de dégarnissement en fonction de la source granulaire et de la qualité de la matrice cimentaire

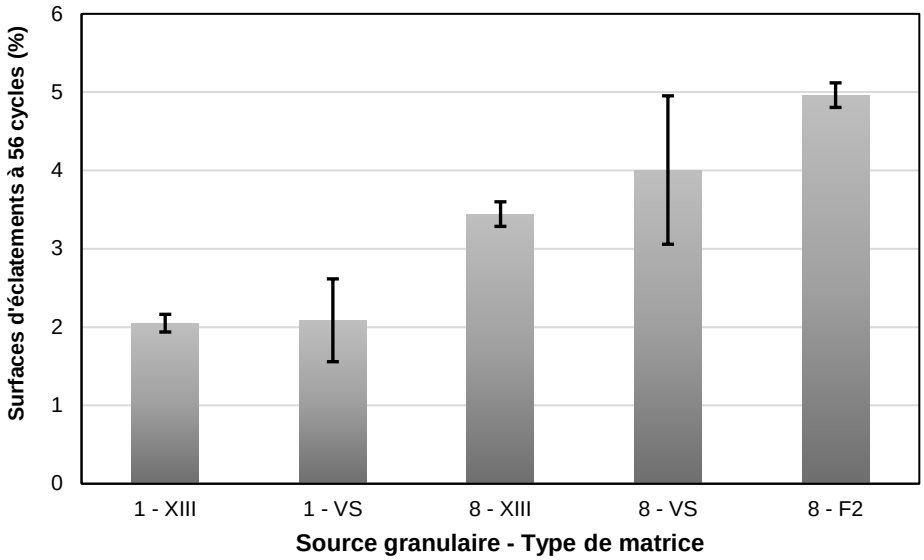


Figure 11.28 - Surfaces d'éclatement en fonction de la source granulaire et de la qualité de la matrice cimentaire.

Le plus faible effet de la matrice sur les éclatements semble logique. Les granulats qui éclatent sont d'abord dégarnis. En l'absence de la protection de la pâte de ciment qui recouvrait la particule, l'éclatement se produira, et ce indépendamment de la qualité de la matrice.

Globalement, ces résultats tendent à montrer que la durabilité à l'écaillage de matériaux granulaires possédant une plus forte susceptibilité au dégarnissement et à l'éclatement (sources 1 et 8) peut être influencée par la qualité de la matrice cimentaire qui les contient. Une matrice cimentaire plus performante diminue nettement les dégarnissements mais a peu d'effet favorable sur les éclatements. À l'inverse, une matrice cimentaire peu performante augmente fortement les dégarnissements mais a relativement peu d'effet sur les éclatements.

Pour conclure, une matrice cimentaire performante est très favorable pour la durabilité du béton à l'écaillage et pour diminuer le dégarnissement, mais ce n'est pas suffisant pour empêcher les éclatements. Il faut donc utiliser des granulats présentant une bonne résistance à l'éclatement.

11.7 Influence de la qualité du réseau d'air

Cette partie de l'analyse vise à mieux comprendre l'influence du $\bar{L}$ sur la durabilité à l'écaillage et la susceptibilité à dégarnir et éclater des granulats. L'analyse porte sur les résultats d'essais réalisés sur un béton de la phase 1 et sur les deux bétons de la phase 5. Tous ces bétons ont été produits avec la source 11. Le béton de la phase 1 possède un facteur d'espacement de 96 µm (Figure 11.29). Les deux bétons de la phase 5 ont des facteurs d'espacements plus élevés de 173 et 224 µm. Dans tous les cas, le facteur d'espacement de ces bétons est toujours conforme à l'exigence de la norme CSA A23.1 (inférieur à 230 µm). Le programme expérimental initial prévoyait un facteur d'espacement dans la plage 250 - 350 µm et un facteur d'espacement supérieur à 350 µm.

La Figure 11.29 montre une légère réduction des pertes massiques avec la diminution du $\overline{L}$. Cependant, il est à noter que les masses de débris sont toutes supérieures à la limite de 500 g/m^2 malgré la protection de facteurs d'espacements conformes à l'exigence de la norme (inférieur à 230 µm).

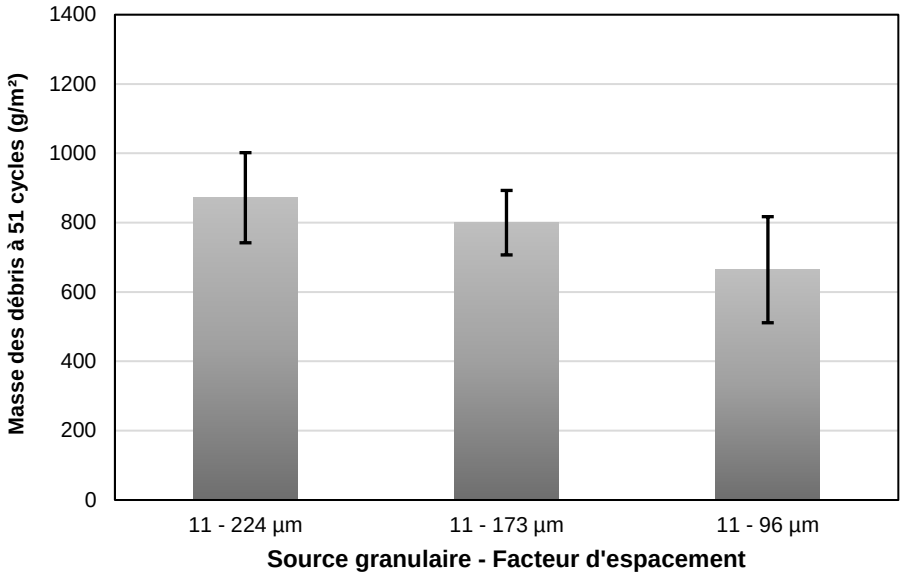


Figure 11.29 - Masse des débris en fonction de la source granulaire et du facteur d'espacement.

L'analyse visuelle des éclatements et dégarnissements a permis de produire les graphiques présentés aux Figures 9.16 et 9.17. La source 11 est dans la catégorie intermédiaire avec une perte au gel-dégel non confiné élevée de 10,2 %. Elle produit donc une quantité appréciable de dégarnissements (environ 1,5 %) et d'éclatements (environ 3 %). Les résultats de la Figure 9.16 montrent que le facteur d'espacement, lorsqu'il est conforme à la norme, n'a pas d'influence sur l'intensité des éclatements. Il n'est malheureusement pas possible de déterminer si un facteur d'espacement plus élevé (350 µm) pourrait avoir un effet défavorable.

Les résultats présentés à la Figure 9.17 suggèrent qu'un facteur d'espacement très faible (96 µm) augmente la susceptibilité au dégarnissement. Il faut cependant noter qu'un dégarnissement de 1,5 % se situe dans le niveau de sévérité moyen.

Le réseau de bulles d'air protège la pâte de ciment et non pas le granulat. Il était donc prévisible qu'il n'y ait pas de relation claire entre le facteur d'espacement et l'intensité des dégarnissements et des éclatements. Pour expliquer les dégarnissements plus élevés obtenus avec le facteur d'espacement de 96 µm, l'hypothèse d'une trop grande quantité de bulles d'air dans le béton (9,8 %) et dans la pâte est envisagée. Cela pourrait fragiliser la fine couche de pâte qui recouvre les particules de gros granulats proches de la surface. Cette fine couche plus fragile pourrait plus facilement être arrachée lors de l'essai d'écaillage.

11.8 Influence du géotextile en fond de moule

Cette partie de l'analyse vise à mieux comprendre l'influence du géotextile en fond de moule sur la durabilité à l'écaillage des bétons. Deux bétons ont été produits avec un liant de type GU et avec la source

granulaire de très bonne qualité utilisée au laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke. Pour chaque gâchée, deux paires de plaques d'écaillage ont été coulées, une avec un géotextile au fond du moule, l'autre sans géotextile. Le géotextile a été retiré pendant la cure sèche avant la mise en pré-saturation. Les deux bétons ont un facteur d'espacement de 156 µm et 191 µm respectivement. Au départ, des facteurs d'espacement inférieur à 230 µm et compris entre 300 et 350 µm étaient visés, de manière à mieux comprendre l'influence possible du facteur d'espacement.

La Figure 11.30 présente la masse des débris après 56 cycles de gel-dégel en fonction du facteur d'espacement et de la présence d'un géotextile (GTX). Toutes les masses de débris sont inférieures à la limite maximale de 500 g/m^2. Ces résultats confirment que le liant GU, utilisé pour les bétons de cette phase, est plus durable à l'écaillage que le liant ternaire utilisé pour certaines des autres phases (notamment la phase 1).

Logiquement, les masses de débris obtenues avec le facteur d'espacement de 156 µm sont plus faibles que celles obtenues avec le facteur d'espacement de 191 µm. Dans la plage de $\bar{L}$ testée, il n'est pas possible de conclure sur l'effet du géotextile sur la durabilité. Dans un cas, le géotextile a légèrement amélioré la durabilité et dans l'autre il a légèrement diminué la durabilité.

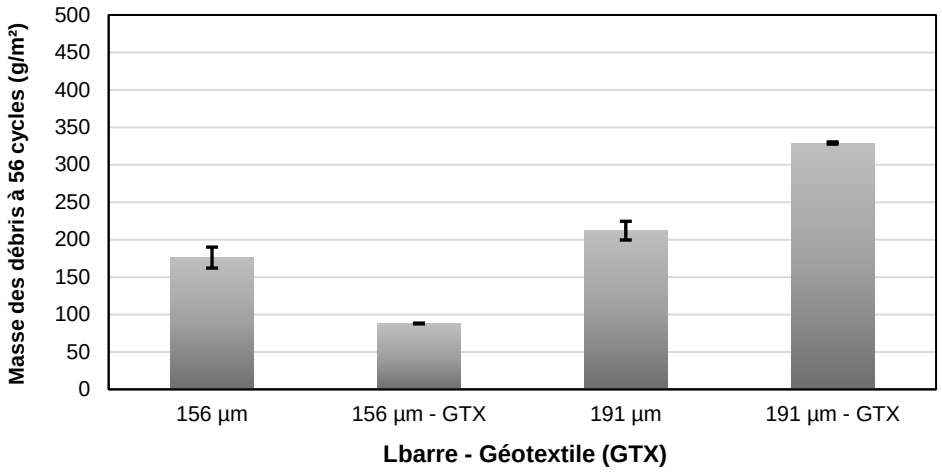


Figure 11.30 - Masse des débris en fonction du facteur d'espacement et de l'utilisation d'un géotextile en fond de moule.

Les Figures 9.18 et 9.19 présentent l'influence du facteur d'espacement et du géotextile sur l'intensité des dégarnissements et des éclatements. Les surfaces éclatées sont toutes très faibles (inférieures à 1,1 %), ce qui est le cas également des surfaces dégarnies (inférieures à 0,5 %). Ces très faibles valeurs découlent de l'utilisation d'un gros granulat de qualité (perte micro-Deval de 10,3 % et perte au gel-dégel non confiné de 5,1 %) combinée à une matrice de classe d'exposition C2 ayant démontré une très bonne durabilité à l'écaillage. Ces résultats confirment que la présence ou l'absence de géotextile n'a aucune influence notable sur l'intensité des dégarnissements ou des éclatements, mais également que la matrice a un rôle important.

Globalement on peut conclure qu'il n'y a pas d'intérêt à utiliser un géotextile pour l'essai d'écaillage dans ce cas-ci. De plus, l'utilisation de géotextile augmente les coûts des matériaux et de main d'œuvre lors de la mise en place et pour l'enlèvement de ce géotextile avant le début de l'essai.

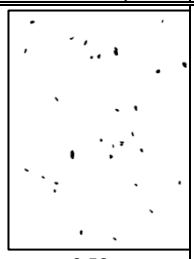
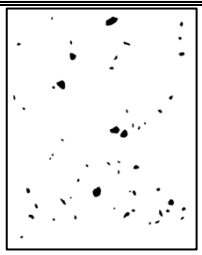
11.9 Analyse des caractéristiques visuelles des surfaces écaillées

La documentation photographique des plaques d'écaillages permet de produire un tableau comparatif pour mettre en évidence l'état de surface des plaques à différentes périodes et avec différentes sources de granulats. Ceci permet de relier le pourcentage de surface dégarnie et éclatée à un aspect visuel de l'état de surface des plaques à la fin de l'essai d'écaillage (Tableau 11.5).

L'examen du Tableau 11.5 suggère que pour des valeurs de surface éclatée de moins de 2,5 %, la plaque ne présente que peu de « taches noires » caractéristiques des éclatements des granulats de type calcaire ou dolomie. Pour ce niveau d'endommagement, les qualités esthétiques de la surface ne semblent pas significativement compromises. De plus, il est à noter que les dégarnissements ne sont souvent que peu visibles, même en nombre et en surface importante. Ce sont surtout les éclatements des granulats qui impactent le plus la qualité esthétique dû à l'apparition de ces « tâches noires ». À noter que les exemples présentés dans le Tableau 11.5 ne sont qu'à titre indicatif. Le choix des images a été fait pour présenter de manière claire les contrastes et non pour démontrer un effet des sources granulaires. Pour d'autres types de pierre, granite ou basalte par exemple, il peut y avoir moins de contraste entre les éclatements et la matrice, comme le montre les images de l'Annexe 3.

Ce type de tableau permettrait de fixer un pourcentage maximal de surface endommagées suite à l'écaillage. Mais la définition de ce pourcentage demeure un processus subjectif. La définition éventuelle d'une valeur limite devra faire l'objet d'un consensus découlant probablement d'une consultation générale parmi tous les intervenants associés à la durabilité des bétons.

Tableau 11.5 - Grille comparative de l'aspect visuel de la surface des plaques d'écaillage.

Intervalle (%)	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5
Type de béton	C2 - 230 µm	VS-14 ; 5-20 mm	VS-11 ; 5-14 mm	XIII-8	VS-8 ; 5-14 mm
Éclatement (%)	 0,59	 1,5	2,5	3,6	4,3
Éclatement et dégarnissement (%)	0,87	2,5	3,2	4,0	4,6
Aspect visuel					

12. CONCLUSION

Cette conclusion générale a pour but de rassembler et de mettre en évidence les principales conclusions et recommandations découlant de cette étude. L'importance du programme expérimental et l'ampleur de l'analyse font en sorte qu'il n'est pas possible de résumer toutes les conclusions et les recommandations contenues dans ce document. Les éléments de contenus qui suivent sont ceux qui ont été identifiés comme les plus significatifs en regard des objectifs scientifiques et techniques spécifiques de cette étude.

- Le choix des sources granulaires et la campagne d'échantillonnage ont été réalisés conjointement par les équipes de l'Université de Sherbrooke, de l'Université Laval et du MTQ. Les sources ont été sélectionnées à partir de bases de données du MTQ et de l'ACRGTQ. Les choix ont été faits à partir des caractéristiques intrinsèques déjà connues : minéralogie, micro-Deval, gel-dégel non confiné. La sélection des 17 sources granulaires a notamment été accomplie sur la base des exigences du Tableau 12 de la norme CSA A23.1, en considérant principalement la perte à l'essai de gel-dégel non confiné et la perte à l'essai micro-Deval. Des sources ont été choisies en raison de leurs faibles pertes aux essais de gel-dégel et micro-Deval. À l'inverse, des sources ont été choisies pour leurs fortes pertes à ces deux essais. De plus, plusieurs sources ont été choisies pour leurs pertes intermédiaires ou pour une perte élevée à l'un des deux essais et faible pour l'autre. La sélection des sources a aussi pris en compte la nature minéralogique (granite, dolomie, calcaire, basalte, grès) pour s'assurer de disposer d'un échantillonnage représentatif et diversifié. Les 17 sources granulaires ont fait l'objet d'une caractérisation détaillée. Cette caractérisation a été accomplie par l'équipe de l'Université Laval, du MTQ et par deux laboratoires mandataires. L'analyse pétrographique a été accomplie par l'équipe de l'Université Laval et du MTQ.

- L'étude a permis de perfectionner une méthode de quantification des éclatements et des dégarnissements des particules du gros granulat lors de l'essai d'écaillage. La méthode consiste à identifier visuellement les éclatements et les dégarnissements des particules du gros granulat selon les critères proposés dans le cadre de cette étude. Les éclatements et dégarnissements sont tracés sur un acétate qui est ensuite analysée à l'aide du logiciel d'analyse d'images (ImageJ). On a montré que cette nouvelle approche est efficace pour quantifier ces types de dommages. Elle est relativement simple à mettre en œuvre et les résultats sont consistants d'un laboratoire et d'un opérateur à l'autre.

- Le lavage du gros granulat peut très nettement diminuer la masse des débris et les dégarnissements du gros granulat. Ces résultats suggèrent que la propreté du gros granulat peut être un paramètre important de la durabilité à l'écaillage du béton. Pour expliquer l'effet favorable du lavage sur la durabilité à l'écaillage (masse des débris), on peut proposer l'hypothèse qu'un granulat « propre » offre une meilleure adhérence avec la pâte de ciment et le mortier. En adhérant mieux aux particules du gros granulat localisées près de la surface, la pâte et le mortier sont moins susceptibles de se détacher et de produire des débris d'écaillage. Il est important toutefois de mentionner qu'aucune corrélation n'a pu être établie entre le % de particules fines (< 80 µm) déterminé lors de l'essai CSA A23.2-5A (2019) et les différents paramètres potentiellement sensibles à la propreté du gros granulat lors de l'essai d'écaillage, soit le % de débris et le % de dégarnissement.

- Il n'y a pas de relation claire entre la masse des débris obtenue lors de l'essai d'écaillage et les pertes à l'essai micro-Deval et au gel-dégel non confiné. Par exemple, on ne constate pas de tendance générale à la hausse de la masse des débris lorsque les pertes sont élevées. Ces résultats apparaissent logiques puisque la masse des débris est principalement produite par l'endommagement de la matrice de mortier. Même si la masse des débris peut sans doute être amplifiée par le dégarnissement et l'éclatement des particules du gros granulat, cette contribution ne semble pas suffisamment importante pour produire un effet clairement mesurable.

- Il existe une tendance générale assez claire entre la surface d'éclatement et les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non-confiné. La mesure de la surface d'éclatement est plus directement liée à la durabilité du gros granulat que la masse des débris, car elle exclue la contribution découlant de l'endommagement de la matrice de mortier. La surface d'éclatement montre une nette tendance à la hausse lorsque les deux pertes augmentent. Les surfaces d'éclatement les plus élevées (> 2,5%) sont majoritairement obtenues avec les sources ayant une combinaison de perte micro-Deval supérieure à 15% et une perte au gel-dégel non-confiné supérieure à 6%. À l'inverse, les surfaces d'éclatement les plus faibles (< 2%) sont majoritairement obtenues avec une combinaison de pertes micro-Deval inférieure à 15% et une perte au gel-dégel non-confiné inférieure à 6%. Ces deux caractéristiques intrinsèques du gros granulat semblent donc des indicateurs potentiellement utiles pour estimer ou prédire la susceptibilité d'un granulat aux éclatements lors d'un essai d'écaillage.

- La surface de dégarnissement n'est pas liée à l'intensité de la perte micro-Deval ou de la perte au gel-dégel non confiné. Ces deux caractéristiques intrinsèques du gros granulat ne sont donc pas des indicateurs fiables pour estimer ou prédire la susceptibilité d'un granulat au dégarnissement lors d'un essai d'écaillage.

- Pour la problématique spécifique de cette étude, le principal impact de l'éclatement des particules concerne l'aspect esthétique des éléments affectés. L'impact esthétique défavorable résulte de l'apparition de zones localisées de couleur plus ou moins sombre qui produisent une apparence tachetée des surfaces. Le seuil de tolérance de ce type de dommage est très subjectif. Même si cela est relativement complexe et subjectif, on a proposé un critère esthétique définissant un seuil de performance de la qualité esthétique d'une surface de bétons présentant des éclatements. Ce seuil de performance a ensuite été utilisé pour identifier les caractéristiques intrinsèques des sources granulaires permettant de satisfaire au mieux ce seuil de performance. Tout en reconnaissant que ce choix est subjectif, il est proposé de fixer un seuil visuel tolérable d'éclatements de 2,0% ou de 2,5% qui dépend du choix des caractéristiques intrinsèques utilisées pour qualifier le gros granulat (nombre pétrographique ou combinaison des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné). Ces seuils ne sont basés que sur la surface d'éclatement, car la surface de dégarnissement semble avoir beaucoup moins d'impact visuel sur la qualité esthétique des surfaces de béton. Ce sera au destinataire de ce rapport de décider de l'intensité des seuils et de l'approche qu'il souhaite privilégier pour les utiliser.

- La définition d'un seuil d'éclatements de 2,5% a permis de proposer une démarche pour aider à prévoir la susceptibilité à l'éclatement du gros granulat lors de l'essai d'écaillage. Cette approche utilise un critère prévisionnel basé sur les pertes individuelles à l'essai micro-Deval et à l'essai de gel-dégel non confiné. La somme des pertes micro-Deval et gel-dégel non confiné est aussi prise en compte pour départager certains granulats potentiellement durables et non durables.

L'approche proposée permet d'identifier un groupe de sources granulaires durables dont la durabilité à l'éclatement a été confirmée en laboratoire. Cependant, elle conduit aussi à l'identification de sources granulaires dont la durabilité à l'éclatement est incertaine. Il faut alors évaluer la durabilité à l'éclatement à l'aide d'un essai d'écaillage en laboratoire, suivi de la quantification les éclatements à l'aide de la procédure d'analyse d'images proposée.

- La définition du seuil de 2,0% d'éclatements a permis de proposer un autre critère pour aider à prévoir la susceptibilité à l'éclatement du gros granulat lors de l'essai d'écaillage. Pour cette approche, le critère prévisionnel est basé sur l'analyse pétrographique. Dans le cas des sources de calcaires et dolomies des Basses-Terres du Saint-Laurent étudiées dans le cadre de cette étude, des valeurs du nombre pétrographique en deçà de 125 et de % de particules médiocres et nuisibles en deçà de 2,0% ont en effet corrélé avec des % d'éclatements inférieurs à 2% lors de l'essai d'écaillage. Ces valeurs ont permis d'identifier un groupe de sources granulaires durables, dont la durabilité à l'éclatement a été confirmée en laboratoire. Comme pour le critère précédent, l'approche pétrographique conduit aussi à l'identification de sources granulaires dont la durabilité à l'éclatement est incertaine. Il faut alors confirmer ou infirmer la durabilité à l'éclatement à l'aide d'un essai d'écaillage en laboratoire, suivi de la quantification des éclatements à l'aide de la procédure d'analyse visuelle proposée.

- Il n'est pas possible de conclure clairement sur l'effet du calibre du gros granulat sur l'intensité des dégarnissements et des éclatements. Néanmoins, les résultats suggèrent que l'utilisation d'un calibre granulaire plus petit (5 - 14 mm vs 5 – 20 mm) pourrait contribuer à diminuer la susceptibilité au dégarnissement de certaines sources granulaires.

- Une matrice haute performance (Type XIII), améliore nettement la performance au dégarnissement des gros granulats dont les pertes aux essais micro-Deval et gel-dégel non confiné sont parmi les plus élevées. Cette matrice, plus adhérente et plus imperméable, peut offrir une meilleure protection contre la saturation et la pénétration des ions chlores dans la porosité des particules de gros granulats. À l'inverse, ces mêmes sources granulaires intégrées dans une matrice moins performante de Type F2, montrent des surfaces de dégarnissement nettement plus importantes. L'influence protectrice d'une matrice cimentaire plus performante découle probablement d'une auréole de transition plus compacte qui adhère plus fortement à la surface du granulat et qui le protège davantage contre la saturation de sa porosité interne. Les résultats suggèrent que la qualité de la matrice n'influence pas la susceptibilité à l'éclatement des particules.

- La présence d'un géotextile en fond de moule n'a pas d'influence notable sur la résistance à l'écaillage (masse des débris) des bétons à air entraîné fabriqués avec le liant Gu. Les essais d'écaillage en laboratoire montrent aussi que le géotextile n'influence pas non plus les surfaces d'éclatement et de dégarnissement de ce type de béton.

- Les essais d'écaillage interlaboratoires avaient principalement pour but d'évaluer l'influence des enceintes de gel-dégel sur la variabilité de l'essai d'écaillage. L'analyse des résultats indique que la procédure d'essai de l'Annexe B de la norme BNQ 2621-905 produit une mesure de la durabilité à l'écaillage (masse des débris après 56 cycles) ayant un coefficient de variation de l'ordre de 40%. Ce coefficient de variation a été obtenu avec un béton de type V-S dont la durabilité peut être qualifiée de marginale, dans la mesure ou la masse des débris moyenne de 640 g/m^2 est supérieure à la limite de 500 g/m^2, sans toutefois atteindre des valeurs très élevées de plus de

1000 g/m^2, comme dans le cas des bétons très peu durables. Cette proximité de la limite maximale de 500 g/m^2 et un coefficient de variation élevé (40%) ont fait en sorte que trois laboratoires ont mesuré une durabilité non conforme (> 500 g/m^2) et deux laboratoires ont mesuré une durabilité conforme (< 500 g/m^2). Il n'a pas été possible de relier les masses de débris mesurées par les laboratoires participant aux caractéristiques climatiques des enceintes de gel-dégel (températures minimales et maximales, durée et vitesses de gel, vitesses du déplacement de l'air dans l'enceinte).

RÉFÉRENCES

[1] R. Gagné et L. Linger, “La durabilité des bétons : bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement,” Presses de l’école nationale des ponts et chaussées, 2008.

[2] Power, T.C., Helmuth, R.A., “Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing”, Highway Research Board, vol. 32, p. 285-297, 1953.

[3] T. C. Powers, “The air requirement of frost resistant concrete,” Highw. Res. Board, vol. 29, p. 184-211, 1949.

[4] M. Pigeon and R. Pleau, « Durability of concrete in cold climates », dans Modern concrete technology 4, London: E & FN Spon, 1995.

[5] R. Defay, I. Prigogine, A. Bellemans et D.H. Everett, « Surface tension and absorption », Longmans ed., London, 1966, p. 243-255.

[6] G. Fagerlund, « Studies of the destruction mechanisms at freezing of porous materials », dans Proceeding of the sixth international congress on the problems raised by frost action, Le Havre, France, Fondation française d'études nordiques, p. 166-196, 1975.

[7] P.E. Petersson, « Scaling résistance tests of concretes - experience from practical use in Sweden », dans Comptes rendus de l'Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, Comité RILEM TC 117, Québec, Canada, p. 249-259, 1993.

[8] C. Foy, M. Pigeon et N. Banthia, « Freeze-thaw durability and deicer salt scaling resistance of a 0.25 water-cement ratio concrete », dans Cement and Concrete Research, vol. 18, n° 4, p. 604-614, 1988.

[9] A. Bilodeau, G.G. Carette, V.M. Malhotra, W.S. Langley, « Influence of curing and drying on salt scaling resistance of fly ash concrete », dans Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, ACI SP-126, V. M. Malhotra éd., p. 210-228, 1991.

[10] D. Whiting, « Durability of high-strength concrete », dans Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p. 169-183, 1987.

[11] R.S. Barrow, K.M. Hadchiti, P.M. Carrasquillo, R.L. Carrasquillo, « Temperature rise and durability of concrete containing fly ash », dans Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete, ACI SP-114, V.M. Malhotra éd., p. 331-347, 1989.

[12] P. Kleiger, S. Gebler, « Fly ash and concrete durability », dans Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p.1043-1069, 1987.

[13] C. Johnston, « Effects of microsilica and class C fly ash on resistance of concrete to rapid freezing and thawing and scaling in the presence of deicing agents », dans Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p.1183-1204, 1987.

[14] G. Fagerlund, « Effect of air-entraining and other admixtures on the salt-scaling resistance of concrete », dans Chalmers International Seminar on some Aspects of Admixture and Industrial By-Products on the Durability of Concrete, Göteburg, Suède, p. 33, 1986.

[15] J. Virtanen, « Field study on the effects of additions on the salt scaling resistance of concrete », dans Nordic Concrete Research, vol. 9, p. 197-212, 1990.

[16] I. K. Battaglia, J. F. Munoz, and S. M. Cramer, « Proposed Behavioral Model for Deicer Scaling Resistance of Slag Cement Concrete », dans J. Mater. Civ. Eng., vol. 22, no. 4, p. 361, 2010.

[17] « CSA A23.1 Béton : Constituants et exécution des travaux », dans CSA A23.1.,CSA, 2014.

[18] Amir N. Hanna, « Aggregate Tests for Portland Cement Concrete Pavements: Review and Recommendations », dans Research Results Digest, n°281, Sept. 2003.

[19] P.-O. Morin-Morisette, « Étude de la durabilité à l'écaillage en présence de sel fondant des bétons avec liant ternaire », Dissertation, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 2016.

[20] « CSA A23.2-29A Méthode d'essai pour déterminer la résistance à la dégradation du gros granulat par abrasion dans l'appareil micro-Deval », dans CSA A23.2., CSA, 2014.

[21] S.A. Senior and C. A. Rogers, « Laboratory tests for predicting coarse aggregate performance in Ontario », dans Transportation Research report 1301, p. 97-106, 1991.

[22] C. Rogers, B. Lane and S. Senior, « The Micro-Deval abrasion test for coarse and fine aggregate in asphalt pavement », dans Materials Engineering and Research Office Report 006, Ministry of Transportation of Ontario, 2003.

[23] C.A. Rogers, M.L. Bailey and B. Price, « Micro-Deval test for evaluating the quality of fine aggregate for concrete and asphalt », dans Transportation Research report 1301, p. 68-76, 1991.

[24] « CSA A23.2-24A Méthode d'essai de résistance au gel et au dégel du gros granulat non confiné », dans CSA A23.2., CSA, 2014.

[25] C.A. Rogers, S.A Senior and D. Boothe, » Development of an unconfined freeze-thaw test for coarse aggregates », dans Report Engineering Materials 87, Ministry of Transportation of Ontario, 1989.

[26] « CSA A23.2-22C Calcul de la résistance à l'écaillage des surfaces de béton exposées à des produits chimiques de déglaçage utilisant la perte de masse », dans CSA A23.2., CSA, 2014.

[27] « Béton prêt à l'emploi - Programme de certification », dans BNQ 2621-905, BNQ, p. 5, 2018.

[28] C. Drolet, « Analyse pétrographique détaillée des gros granulats », MTQ, 2019.

[29] ImageJ, sur https://imagej.net/Welcome, consulté le 03/09/2020 à 22 h 54.

[30] A. Paul, « D-Cracking (Durability Cracking) – Cause & Prevention » sur https://civildigital.com/d-cracking-durability-cracking-cause-prevention/, consulté de 26/03/2021.

[31] E. Fréchette et N. Pouliot « Rapport de visites de chambres d'écaillage du béton », Ministère des Transports du Québec, Projet DB-19-29, 2019, 37 p.

[32] Hooton, D. "Canadian use of ground granulated blast-fournace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete", Canadian journal of Civil Engineering, vol. 27, no. 4. p. 754-760, 2000.

[33] Bouzoubaa. N., Bilodeau, A., Fournier, B., "De-icing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials. Proc. 6th CANMET/ACI Conference on durability of concrete", Supp. papers, Thessaloniki. pp. 791-821, 2003.

[34] Tourenq, C., Denis, A. « Les essais de granulats ». Rapport de recherche LPC, no. 114. 91 p., 1982.

[35] Fowler, D.W., Allen, J.J., Lange, A., Range, P. "The Prediction of Coarse Aggregate Performance by Micro-Deval and Other Aggregate Tests", ICAR Report 507-1F, International Center for Aggregate Research. University of Texas at Austin. 609 p., 2006.

ANNEXE 1 – Macros ImageJ pour la mesure des surfaces d'éclatement et de dégarnissement

surf_totale.txt

```
macro "surface_totale [m]"      {

// Color Thresholder 1.52k
// Autogenerated macro, single images only!
min=newArray(3);
max=newArray(3);
filter=newArray(3);
a=getTitle();
run("RGB Stack");
run("Convert Stack to Images");
selectWindow("Red");
rename("0");
selectWindow("Green");
rename("1");
selectWindow("Blue");
rename("2");
min[0]=0;
max[0]=255;
filter[0]="pass";
min[1]=0;
max[1]=133;
filter[1]="pass";
min[2]=0;
max[2]=255;
filter[2]="pass";
for (i=0;i<3;i++){
  selectWindow(""+i);
  setThreshold(min[i], max[i]);
  run("Convert to Mask");
  if (filter[i]=="stop")  run("Invert");
}
imageCalculator("AND create", "0","1");
imageCalculator("AND create", "Result of 0","2");
for (i=0;i<3;i++){
  selectWindow(""+i);
  close();
}
selectWindow("Result of 0");
close();
selectWindow("Result of Result of 0");
rename(a);
// Colour Thresholding-------------
// modification fichier en B&W
run("8-bit");

//inversion B&W
//setAutoThreshold("Default");
//run("Threshold...");
//setThreshold(0, 128);
//setOption("BlackBackground", true);
//run("Convert to Mask");


// numération des dégarnissements
run("Analyze Particles...", "size=1330-300000 circularity=0.2-1.00 show=Masks display
clear summarize add");

}
```

surf_eclat.txt

```
macro "surface_eclatement [m]"  {


// suppression du rouge

min=newArray(3);
max=newArray(3);
filter=newArray(3);
a=getTitle();
run("RGB Stack");
run("Convert Stack to Images");
selectWindow("Red");
rename("0");
selectWindow("Green");
rename("1");
selectWindow("Blue");
rename("2");
min[0]=0;
max[0]=155;
filter[0]="pass";
min[1]=0;
max[1]=151;
filter[1]="pass";
min[2]=0;
max[2]=152;
filter[2]="pass";
for (i=0;i<3;i++){
  selectWindow(""+i);
  setThreshold(min[i], max[i]);
  run("Convert to Mask");
  if (filter[i]=="stop")  run("Invert");
}
imageCalculator("AND create", "0","1");
imageCalculator("AND create", "Result of 0","2");
for (i=0;i<3;i++){
  selectWindow(""+i);
  close();
}
selectWindow("Result of 0");
close();
selectWindow("Result of Result of 0");
rename(a);

// modification fichier en B&W
run("8-bit");

// numération des éclatements
run("Analyze Particles...", "size=1330-300000 circularity=0.2-1.00 show=Masks display
clear summarize add");


}
```

ANNEXE 2 – Résultats détaillés des essais d'écaillage réalisés à l'Université Laval

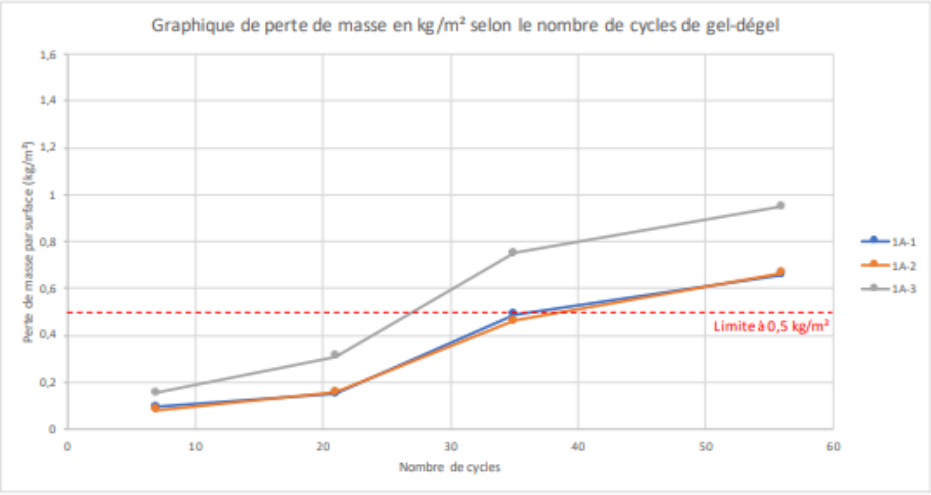
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 1A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	1A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	115 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	8,1%
Date de fabrication :	2019-07-30	**Masse volumique :**	2229 kg/m^3
W/C contact :	12h15	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

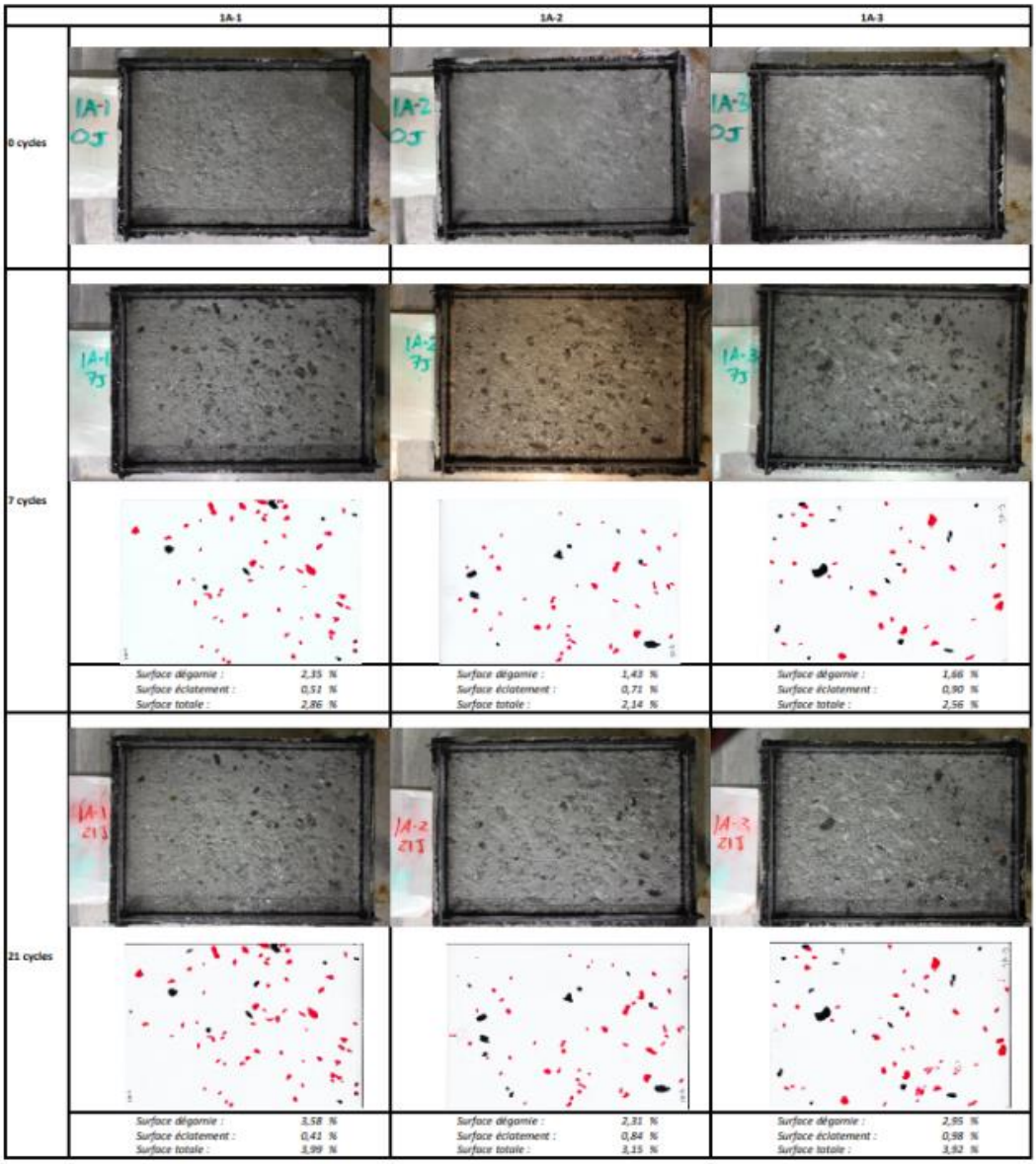
Résultats

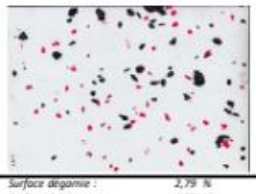
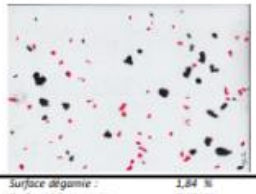
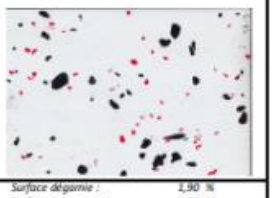
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
1A-1	0	0,0	550,4	2019-09-03				
1A-2	0	0,0	545,3					
1A-3	0	0,0	542,7					
1A-1	7	5,3	550,4	2019-09-10	2-A	5,3	0,1	**0,1**
1A-2	7	4,4	545,3		1-A	4,4	0,1	
1A-3	7	8,5	542,7		2-A	8,5	0,2	
1A-1	21	2,9	550,4	2019-10-01	2-A	8,2	0,1	**0,2**
1A-2	21	4,2	545,3		2-A	8,6	0,2	
1A-3	21	8,3	542,7		3-A	16,8	0,3	
1A-1	35	18,7	550,4	2019-10-15	4-B	26,9	0,5	**0,6**
1A-2	35	16,7	545,3		4-B	25,3	0,5	
1A-3	35	23,9	542,7		5-B	40,7	0,7	
1A-1	56	9,3	550,4	2019-11-05	5-C	36,2	0,7	**0,8**
1A-2	56	11,0	545,3		5-B	36,3	0,7	
1A-3	56	10,9	542,7		5-C	51,6	1,0	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020


1A-1
1A-2
1A-3
0 cycles
7 cycles
21 cycles
Surface dégarnie : 2,35 %
Surface éclatement : 0,51 %
Surface totale : 2,86 %
Surface dégarnie : 1,43 %
Surface éclatement : 0,71 %
Surface totale : 2,14 %
Surface dégarnie : 1,66 %
Surface éclatement : 0,90 %
Surface totale : 2,56 %
Surface dégarnie : 3,58 %
Surface éclatement : 0,41 %
Surface totale : 3,99 %
Surface dégarnie : 2,31 %
Surface éclatement : 0,84 %
Surface totale : 3,15 %
Surface dégarnie : 2,95 %
Surface éclatement : 0,98 %
Surface totale : 3,92 %

	1A-1	1A-2	1A-3
35 cycles			
	Surface dégamie : 3,85 % Surface éclatement : 1,12 % Surface totale : 4,98 %	Surface dégamie : 2,60 % Surface éclatement : 1,06 % Surface totale : 3,66 %	Surface dégamie : 2,78 % Surface éclatement : 1,72 % Surface totale : 4,50 %
56 cycles			
			
	Surface dégamie : 2,79 % Surface éclatement : 3,63 % Surface totale : 6,42 %	Surface dégamie : 1,84 % Surface éclatement : 2,40 % Surface totale : 4,24 %	Surface dégamie : 1,90 % Surface éclatement : 3,93 % Surface totale : 5,83 %

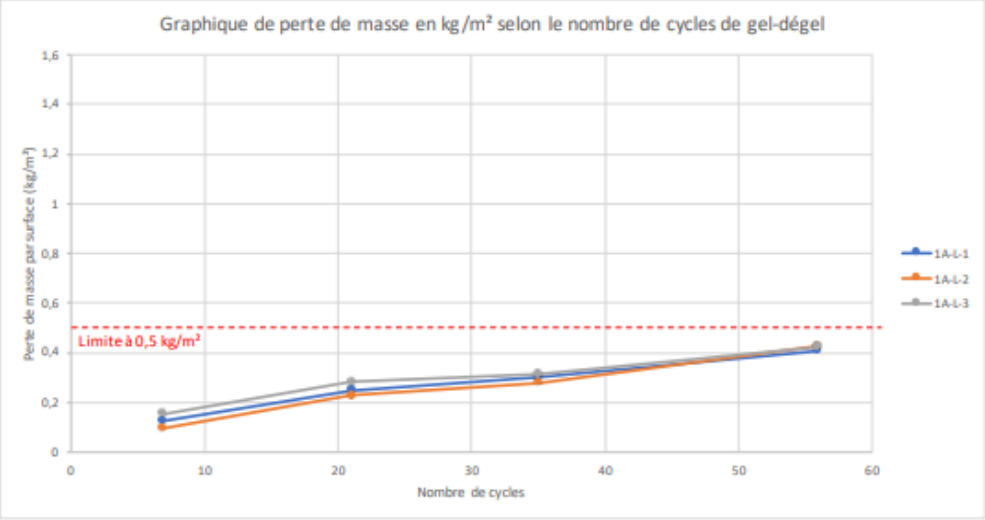
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 1A Lavé	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	1A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	200 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	10,4%
Date de fabrication :	2020-07-02	**Masse volumique :**	2159 kg/m^3
W/C contact :	10h37	**Essai réalisé :**	E. Poiré
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

Résultats

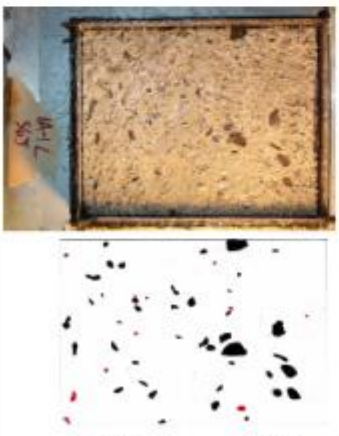
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
1A-L-1	0	0,0	550,8	2020-08-06				
1A-L-2	0	0,0	568,2					
1A-L-3	0	0,0	568,2					
1A-L-1	7	7,0	550,8	2020-08-13	2-A	7,0	0,1	**0,1**
1A-L-2	7	5,5	568,2		2-A	5,5	0,1	
1A-L-3	7	8,8	568,2		2-A	8,8	0,2	
1A-L-1	21	6,8	550,8	2020-08-27	3-B	13,8	0,3	**0,3**
1A-L-2	21	7,5	568,2		3-B	13,0	0,2	
1A-L-3	21	7,2	568,2		3-A	16,0	0,3	
1A-L-1	35	2,7	550,8	2020-09-24	3-C	16,5	0,3	**0,3**
1A-L-2	35	2,8	568,2		3-B	15,8	0,3	
1A-L-3	35	1,7	568,2		3-B	17,7	0,3	
1A-L-1	56	5,9	550,8	2020-10-15	4-C	22,5	0,4	**0,4**
1A-L-2	56	8,5	568,2		4-C	24,3	0,4	
1A-L-3	56	6,4	568,2		4-C	24,0	0,4	

Notes : Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre 7 et 21 cycles



Version 2.1 - Sept 2020

	1A-L-1	1A-L-2	1A-L-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 1,04 % Surface éclatement : 0,97 % Surface totale : 2,01 %	Surface dégarnie : 1,42 % Surface éclatement : 0,39 % Surface totale : 1,81 %	Surface dégarnie : 0,79 % Surface éclatement : 0,42 % Surface totale : 1,22 %
21 cycles			
	Surface dégarnie : 0,63 % Surface éclatement : 2,42 % Surface totale : 3,05 %	Surface dégarnie : 1,04 % Surface éclatement : 1,74 % Surface totale : 2,77 %	Surface dégarnie : 1,62 % Surface éclatement : 0,77 % Surface totale : 2,38 %

	1A-L-1	1A-L-2	1A-L-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 0,75 % Surface éclatement : 2,96 % Surface totale : 3,71 %	Surface dégarnie : 1,32 % Surface éclatement : 2,24 % Surface totale : 3,57 %	Surface dégarnie : 1,54 % Surface éclatement : 1,39 % Surface totale : 2,94 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 1,03 % Surface éclatement : 3,59 % Surface totale : 4,62 %	Surface dégarnie : 1,20 % Surface éclatement : 3,09 % Surface totale : 4,28 %	Surface dégarnie : 0,82 % Surface éclatement : 2,75 % Surface totale : 3,57 %

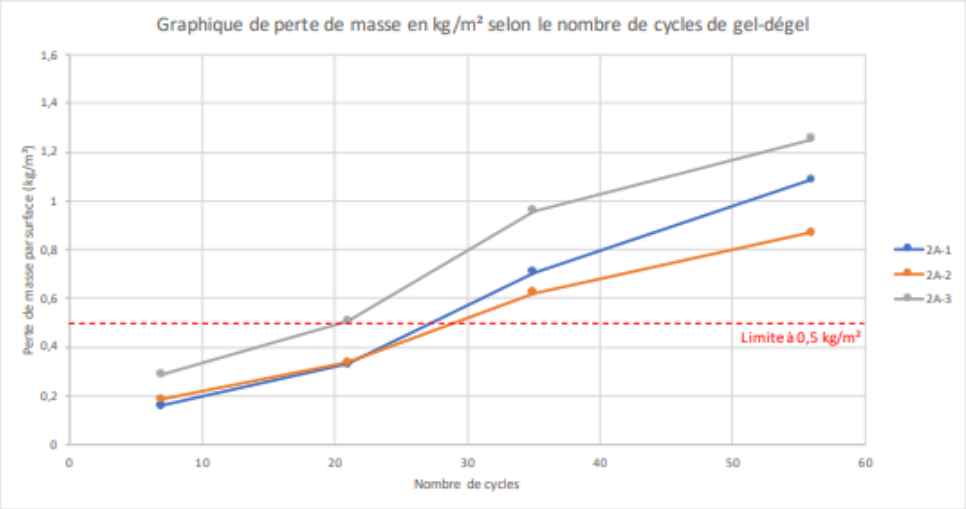
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 2A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	2A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	105 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	7,1%
Date de fabrication :	2019-07-30	**Masse volumique :**	2248 kg/m^3
W/C contact :	12h15	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

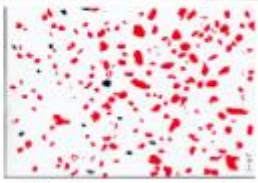
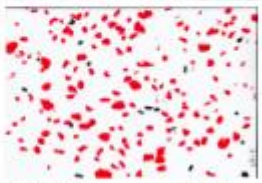
Résultats

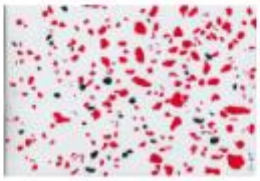
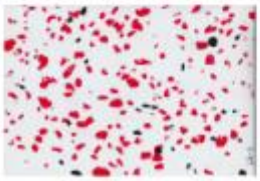
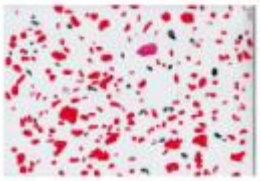
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
2A-1	0	0,0	530,9	2019-09-03				
2A-2	0	0,0	549,1					
2A-3	0	0,0	551,1					
2A-1	7	8,6	530,9	2019-09-10	2-A	8,6	0,2	**0,2**
2A-2	7	10,3	549,1		3-A	10,3	0,2	
2A-3	7	15,9	551,1		3-A	15,9	0,3	
2A-1	21	9,0	530,9	2019-10-01	3-A	17,6	0,3	**0,4**
2A-2	21	8,2	549,1		3-A	18,5	0,3	
2A-3	21	12,0	551,1		4-A	27,9	0,5	
2A-1	35	19,9	530,9	2019-10-15	5-A	37,5	0,7	**0,8**
2A-2	35	15,7	549,1		5-A	34,2	0,6	
2A-3	35	25,0	551,1		5-A	52,9	1,0	
2A-1	56	20,3	530,9	2019-11-05	5-B	57,8	1,1	**1,1**
2A-2	56	13,7	549,1		5-B	47,9	0,9	
2A-3	56	16,1	551,1		5-B	69,0	1,3	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	2A-1	2A-2	2A-3
0 cycles			
7 cycles	Surface dégamie : 10,99 % Surface éclatement : 0,39 % Surface totale : 11,38 %	Surface dégamie : 11,40 % Surface éclatement : 0,59 % Surface totale : 11,99 %	Surface dégamie : 11,00 % Surface éclatement : 0,54 % Surface totale : 11,53 %
21 cycles	 Surface dégamie : 12,70 % Surface éclatement : 0,52 % Surface totale : 13,22 %	 Surface dégamie : 12,74 % Surface éclatement : 0,66 % Surface totale : 13,40 %	Surface dégamie : 12,84 % Surface éclatement : 0,54 % Surface totale : 13,39 %

	2A-1	2A-2	2A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 13,38 % Surface éclatement : 0,87 % Surface totale : 14,25 %	Surface dégarnie : 13,30 % Surface éclatement : 0,90 % Surface totale : 14,20 %	Surface dégarnie : 13,92 % Surface éclatement : 0,80 % Surface totale : 14,72 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 13,96 % Surface éclatement : 1,54 % Surface totale : 15,50 %	Surface dégarnie : 13,28 % Surface éclatement : 1,33 % Surface totale : 14,60 %	Surface dégarnie : 14,63 % Surface éclatement : 1,11 % Surface totale : 15,74 %

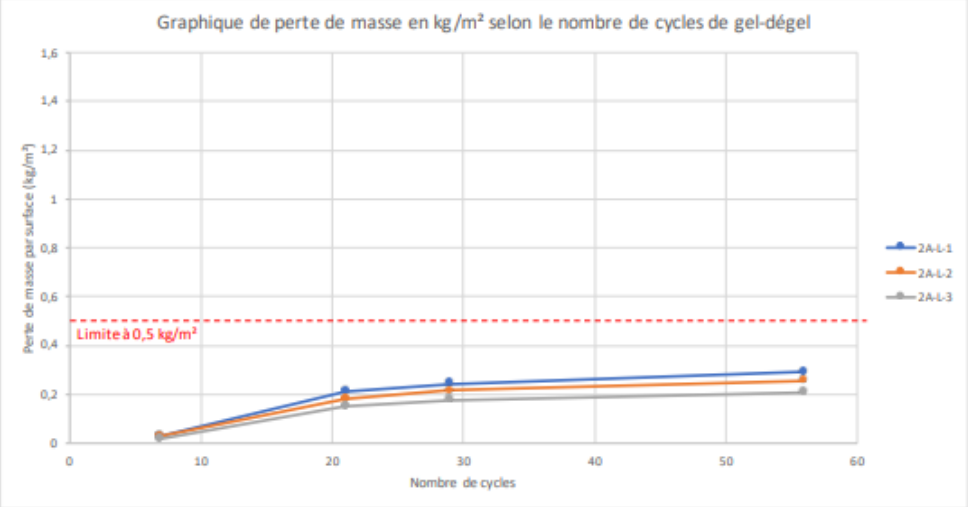
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 2A Lavé	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	2A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	115 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	8,8%
Date de fabrication :	2020-07-28	**Masse volumique :**	2212 kg/m^3
W/C contact :	10h20	**Essai réalisé :**	E. Poiré
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

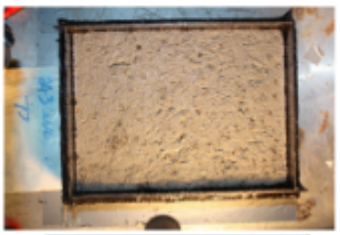
Résultats

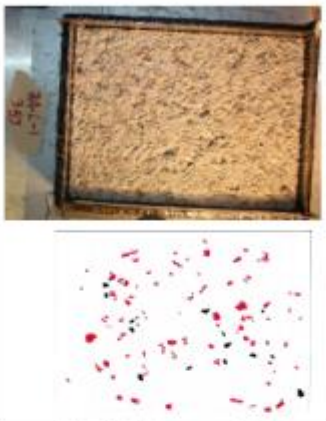
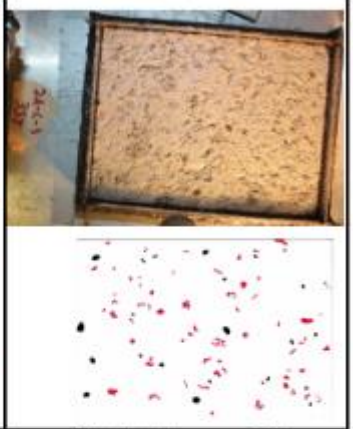
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
2A-L-1	0	0,0	539,5	2020-09-03				
2A-L-2	0	0,0	540,3					
2A-L-3	0	0,0	541,5					
2A-L-1	7	1,6	539,5	2020-09-24	1-A	1,6	0,0	
2A-L-2	7	1,7	540,3		1-A	1,7	0,0	**0,0**
2A-L-3	7	1,0	541,5		1-A	1,0	0,0	
2A-L-1	21	9,9	539,5	2020-10-08	3-A	11,5	0,2	
2A-L-2	21	8,1	540,3		2-A	9,8	0,2	**0,2**
2A-L-3	21	7,0	541,5		2-A	8,1	0,1	
2A-L-1	29	1,6	539,5	2020-10-22	3-A	13,1	0,2	
2A-L-2	29	1,8	540,3		3-A	11,6	0,2	**0,2**
2A-L-3	29	1,5	541,5		2-A	9,6	0,2	
2A-L-1	56	2,7	539,5	2020-11-18	3-A	15,8	0,3	
2A-L-2	56	2,2	540,3		3-A	13,8	0,3	**0,3**
2A-L-3	56	1,6	541,5		3-B	11,3	0,2	

Notes : Mesures réalisées à 29 cycles au lieu de 35 cycles occasionnées par un bris de la chambre durant 6 jours
Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre 0 et 7 cycles



Version 2.1 - Sept 2020

	2A-L-1	2A-L-2	2A-L-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 0,68 % *Surface éclatement :* 0,11 % *Surface totale :* 0,79 %	*Surface dégarnie :* 0,68 % *Surface éclatement :* 0,21 % *Surface totale :* 0,89 %	*Surface dégarnie :* 0,46 % *Surface éclatement :* 0,26 % *Surface totale :* 0,72 %
21 cycles			
	Surface dégarnie : - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %	*Surface dégarnie :* - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %	*Surface dégarnie :* - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %

	2A-L-1	2A-L-2	2A-L-3
29 cycles			
	Surface dégarnie : 2,81 % *Surface éclatement :* 0,51 % *Surface totale :* 3,32 %	*Surface dégarnie :* 3,21 % *Surface éclatement :* 0,65 % *Surface totale :* 3,87 %	*Surface dégarnie :* 2,04 % *Surface éclatement :* 0,69 % *Surface totale :* 2,73 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 4,49 % *Surface éclatement :* 0,94 % *Surface totale :* 5,43 %	*Surface dégarnie :* 5,10 % *Surface éclatement :* 0,96 % *Surface totale :* 6,05 %	*Surface dégarnie :* 3,04 % *Surface éclatement :* 1,15 % *Surface totale :* 4,19 %

Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

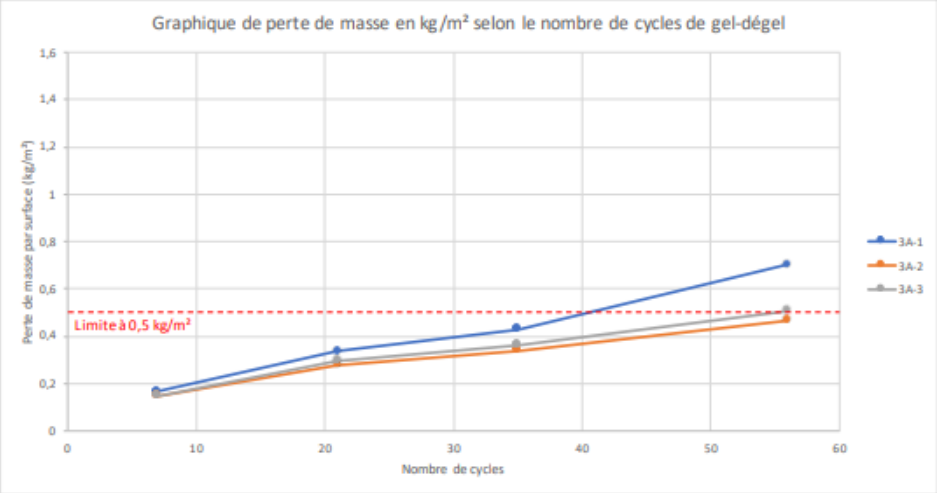
Mélange : Mix 3A
Source du granulat : 3A
Projet/Contrat : MTQ - écaillage
Type de béton : Béton coulé
Batch No : 1
Date de fabrication : 2020-06-30
W/C contact : 12h17
Historique de cure : 100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)

Norme : BNQ 2621-905 / 2018
Consolidation : Bourroir
Dimension dalle : 300 mm x 230 mm
Affaissement : 100 mm
Teneur en air : 6,0%
Masse volumique : 2307 kg/m^3
Essai réalisé : E. Poiré
A. De Almeida Rodrigues

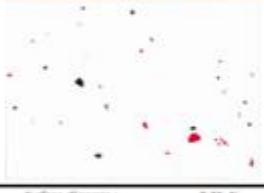
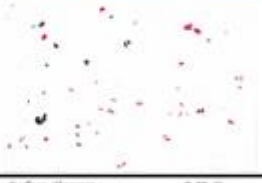
Résultats

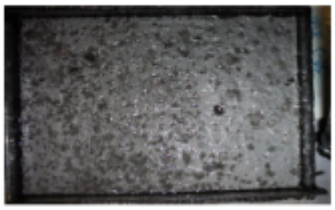
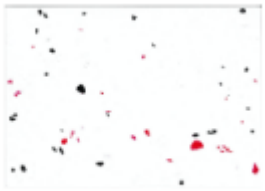
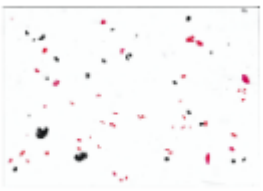
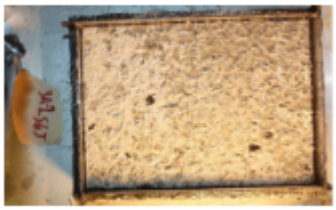
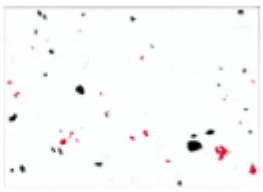
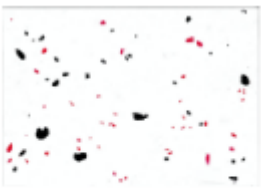
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
3A-1	0	0,0	552,6	2020-08-04				
3A-2	0	0,0	552,4					
3A-3	0	0,0	554,8					
3A-1	7	9,3	552,6	2020-08-11	2-A	9,3	0,2	0,2
3A-2	7	8,1	552,4		2-A	8,1	0,1	
3A-3	7	8,2	554,8		2-A	8,2	0,1	
3A-1	21	9,3	552,6	2020-08-25	3-A	18,5	0,3	0,3
3A-2	21	7,2	552,4		3-A	15,4	0,3	
3A-3	21	8,3	554,8		3-A	16,5	0,3	
3A-1	35	5,2	552,6	2020-09-22	4-A	23,7	0,4	0,4
3A-2	35	3,4	552,4		3-A	18,7	0,3	
3A-3	35	3,7	554,8		4-A	20,2	0,4	
3A-1	56	15,2	552,6	2020-10-13	5-B	38,9	0,7	0,6
3A-2	56	7,1	552,4		4-A	25,8	0,5	
3A-3	56	7,9	554,8		4-B	28,1	0,5	

Notes : Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre les cycles 21 et 35.



Version 2.1 - Sept 2020

	3A-1	3A-2	3A-3
0 cycles			
7 cycles	Surface dégarnie : 0,58 % Surface éclatement : 0,36 % Surface totale : 0,94 %	 Surface dégarnie : 0,35 % Surface éclatement : 0,24 % Surface totale : 0,63 %	 Surface dégarnie : 0,40 % Surface éclatement : 0,33 % Surface totale : 0,72 %
21 cycles	Surface dégarnie : 0,81 % Surface éclatement : 0,62 % Surface totale : 1,42 %	Surface dégarnie : 0,50 % Surface éclatement : 0,60 % Surface totale : 1,10 %	Surface dégarnie : 0,81 % Surface éclatement : 0,51 % Surface totale : 1,32 %

	3A-1	3A-2	3A-3
35 cycles		 	
	Surface dégarnie : 0,85 % *Surface éclatement :* 0,99 % *Surface totale :* 1,84 %	*Surface dégarnie :* 0,81 % *Surface éclatement :* 0,64 % *Surface totale :* 1,45 %	*Surface dégarnie :* 0,97 % *Surface éclatement :* 0,72 % *Surface totale :* 1,69 %
56 cycles		 	
	Surface dégarnie : 0,93 % *Surface éclatement :* 1,27 % *Surface totale :* 2,20 %	*Surface dégarnie :* 0,79 % *Surface éclatement :* 0,97 % *Surface totale :* 1,76 %	*Surface dégarnie :* 0,87 % *Surface éclatement :* 1,45 % *Surface totale :* 2,32 %

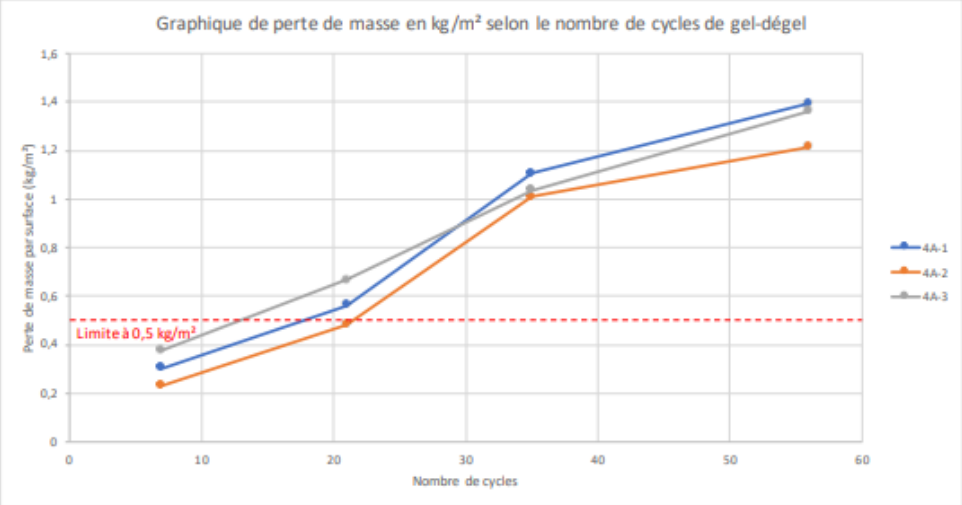
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 4A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	4A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	90 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	7,9%
Date de fabrication :	2019-07-30	**Masse volumique :**	2311 kg/m^3
W/C contact :	10h30	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

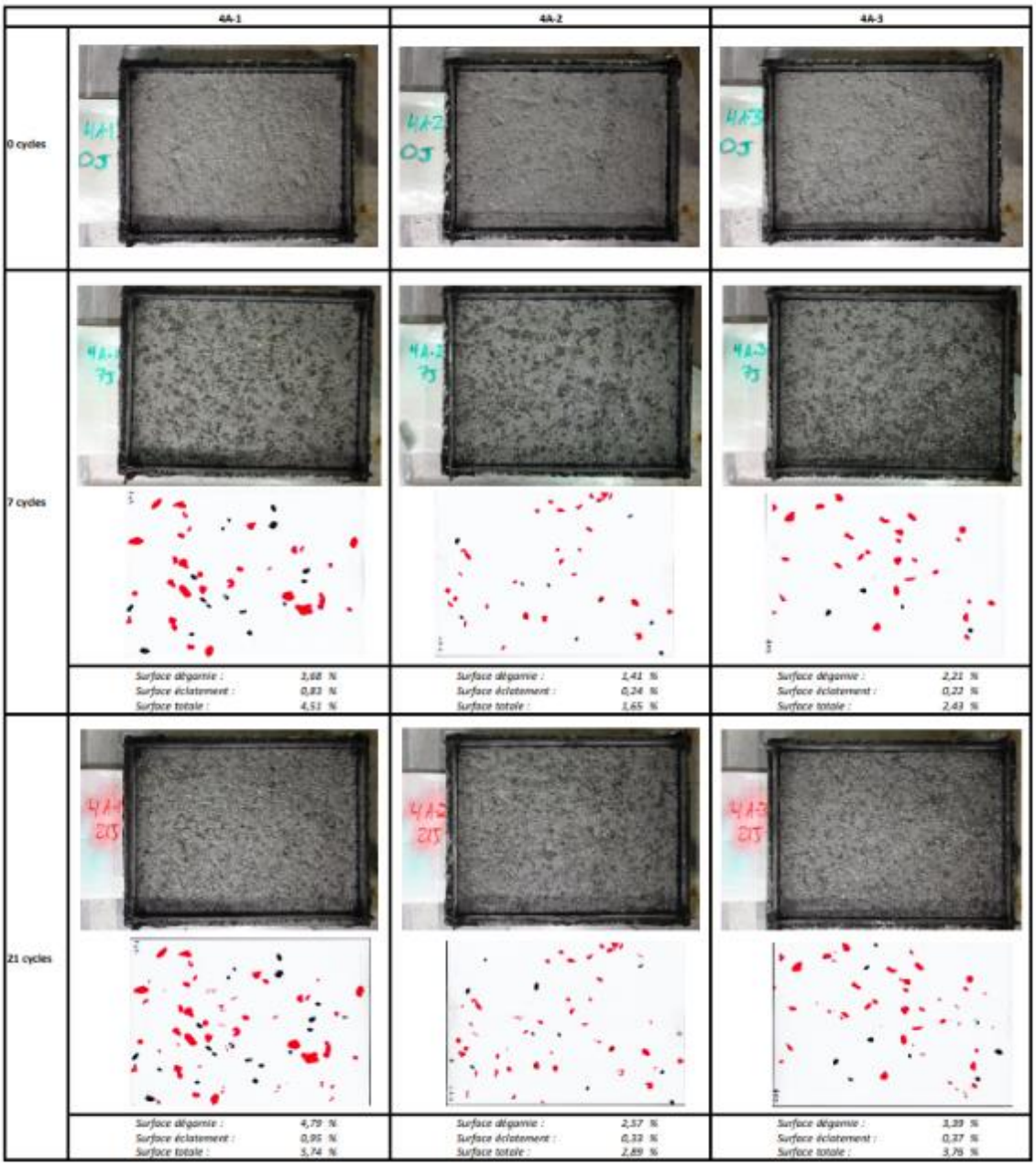
Résultats

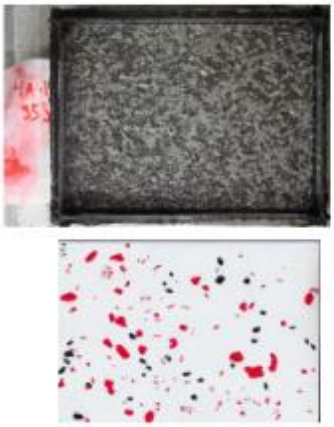
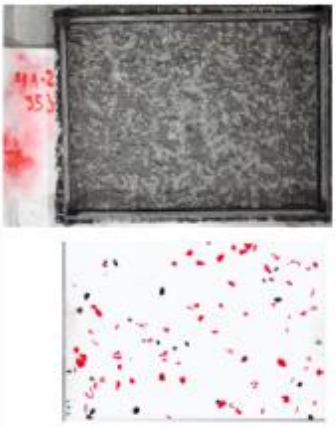
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
4A-1	0	0,0	542,7	2019-09-03				
4A-2	0	0,0	552,4					
4A-3	0	0,0	551,2					
4A-1	7	16,4	542,7	2019-09-10	3-A	16,4	0,3	**0,3**
4A-2	7	12,8	552,4		3-A	12,8	0,2	
4A-3	7	20,8	551,2		4-A	20,8	0,4	
4A-1	21	14,1	542,7	2019-10-01	5-A	30,5	0,6	**0,6**
4A-2	21	14,0	552,4		4-A	26,8	0,5	
4A-3	21	15,9	551,2		5-A	36,7	0,7	
4A-1	35	29,5	542,7	2019-10-15	5-B	60,0	1,1	**1,1**
4A-2	35	29,0	552,4		5-A	55,8	1,0	
4A-3	35	20,4	551,2		5-A	57,1	1,0	
4A-1	56	15,7	542,7	2019-11-05	5-B	75,7	1,4	**1,3**
4A-2	56	11,3	552,4		5-B	67,1	1,2	
4A-3	56	18,0	551,2		5-A	75,1	1,4	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020


4A-1
4A-2
4A-3
0 cycles
7 cycles
Surface dégarnie : 1,68 %
Surface éclatement : 0,83 %
Surface totale : 4,51 %
Surface dégarnie : 1,41 %
Surface éclatement : 0,24 %
Surface totale : 1,65 %
Surface dégarnie : 2,21 %
Surface éclatement : 0,22 %
Surface totale : 2,43 %
21 cycles
Surface dégarnie : 4,79 %
Surface éclatement : 0,95 %
Surface totale : 5,74 %
Surface dégarnie : 2,57 %
Surface éclatement : 0,33 %
Surface totale : 2,89 %
Surface dégarnie : 3,39 %
Surface éclatement : 0,37 %
Surface totale : 3,76 %

	4A-1	4A-2	4A-3
35 cycles			
	Surface dégonnie : 5,61 % Surface éclatement : 1,49 % Surface totale : 7,11 %	Surface dégonnie : 3,38 % Surface éclatement : 0,68 % Surface totale : 4,06 %	Surface dégonnie : 3,47 % Surface éclatement : 0,66 % Surface totale : 4,13 %
56 cycles			
	Surface dégonnie : 5,43 % Surface éclatement : 1,77 % Surface totale : 7,19 %	Surface dégonnie : 3,74 % Surface éclatement : 1,57 % Surface totale : 5,30 %	Surface dégonnie : 3,80 % Surface éclatement : 0,78 % Surface totale : 4,59 %

Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

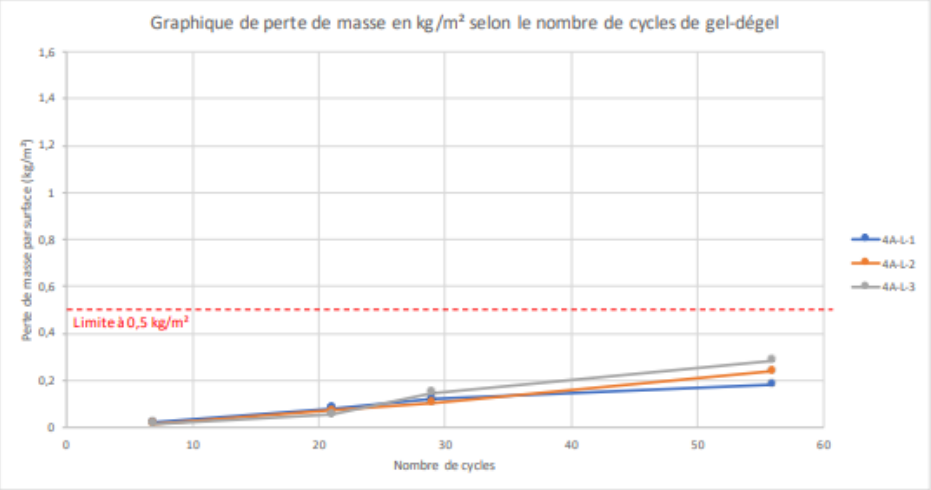
Mélange : Mix 4A Lavé
Source du granulat : 4A
Projet/Contrat : MTQ - écaillage
Type de béton : Béton coulé
Batch No : 1
Date de fabrication : 2020-07-28
W/C contact : 11h00
Historique de cure : 100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)

Norme : BNQ 2621-905 / 2018
Consolidation : Bourroir
Dimension dalle : 300 mm x 230 mm
Affaissement : 185 mm
Teneur en air : 8,0%
Masse volumique : 2317 kg/m^3
Essai réalisé : E. Poiré
A. De Almeida Rodrigues

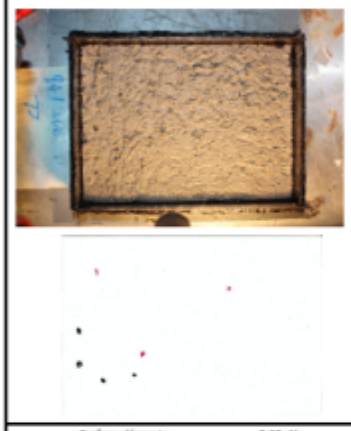
Résultats

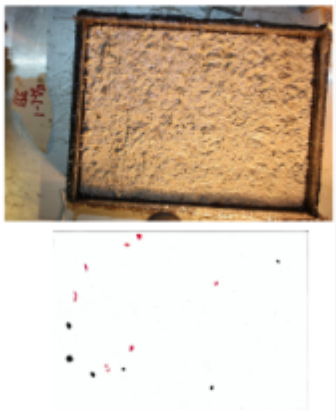
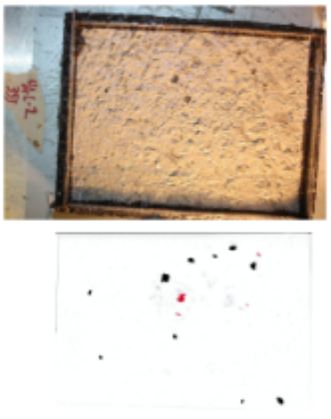
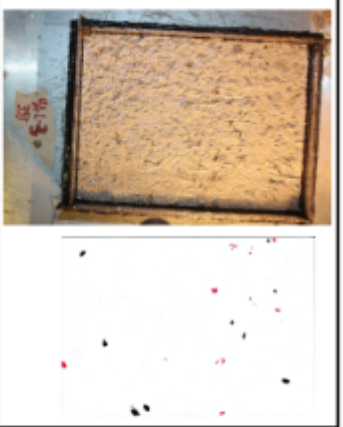
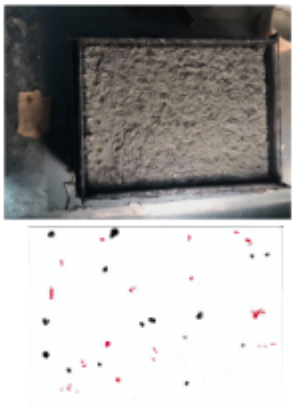
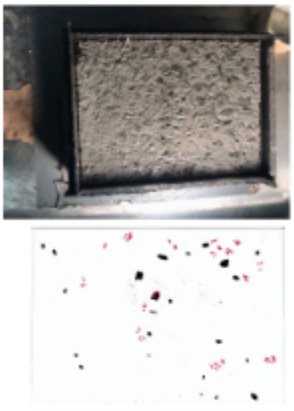
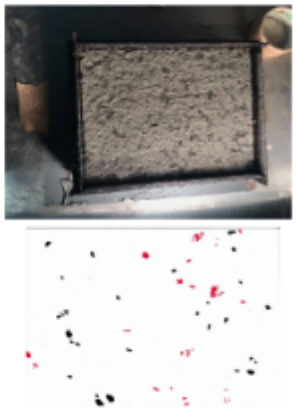
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
4A-L-1	0	0,0	554,4	2020-09-03				
4A-L-2	0	0,0	542,6					
4A-L-3	0	0,0	538,7					
4A-L-1	7	1,3	554,4	2020-09-24	1-A	1,3	0,0	**0,0**
4A-L-2	7	0,8	542,6		0-A	0,8	0,0	
4A-L-3	7	0,8	538,7		0-A	0,8	0,0	
4A-L-1	21	3,2	554,4	2020-10-08	1-A	4,5	0,1	**0,1**
4A-L-2	21	3,2	542,6		1-A	4,0	0,1	
4A-L-3	21	2,1	538,7		1-A	2,9	0,1	
4A-L-1	29	2,4	554,4	2020-10-22	2-A	6,8	0,1	**0,1**
4A-L-2	29	1,7	542,6		2-A	5,7	0,1	
4A-L-3	29	5,0	538,7		2-A	7,9	0,1	
4A-L-1	56	3,3	554,4	2020-11-18	3-A	10,1	0,2	**0,2**
4A-L-2	56	7,4	542,6		3-A	13,0	0,2	
4A-L-3	56	7,4	538,7		3-A	15,3	0,3	

Notes : Mesures réalisées à 29 cycles au lieu de 35 cycles occasionnées par un bris de la chambre durant 6 jours
Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre 0 et 7 cycles



Version 2.1 - Sept 2020

	4A-L-1	4A-L-2	4A-L-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégamie : 0,33 % *Surface éclatement :* 0,10 % *Surface totale :* 0,42 %	*Surface dégamie :* 0,28 % *Surface éclatement :* 0,11 % *Surface totale :* 0,39 %	*Surface dégamie :* 0,07 % *Surface éclatement :* 0,20 % *Surface totale :* 0,26 %
21 cycles			
	Surface dégamie : - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %	*Surface dégamie :* - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %	*Surface dégamie :* - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %

	4A-L-1	4A-L-2	4A-L-3
29 cycles			
	Surface dégamie : 0,42 % Surface éclatement : 0,19 % Surface totale : 0,61 %	Surface dégamie : 0,32 % Surface éclatement : 0,44 % Surface totale : 0,75 %	Surface dégamie : 0,42 % Surface éclatement : 0,35 % Surface totale : 0,77 %
56 cycles			
	Surface dégamie : 0,66 % Surface éclatement : 0,57 % Surface totale : 1,22 %	Surface dégamie : 0,57 % Surface éclatement : 0,82 % Surface totale : 1,40 %	Surface dégamie : 0,81 % Surface éclatement : 0,80 % Surface totale : 1,61 %

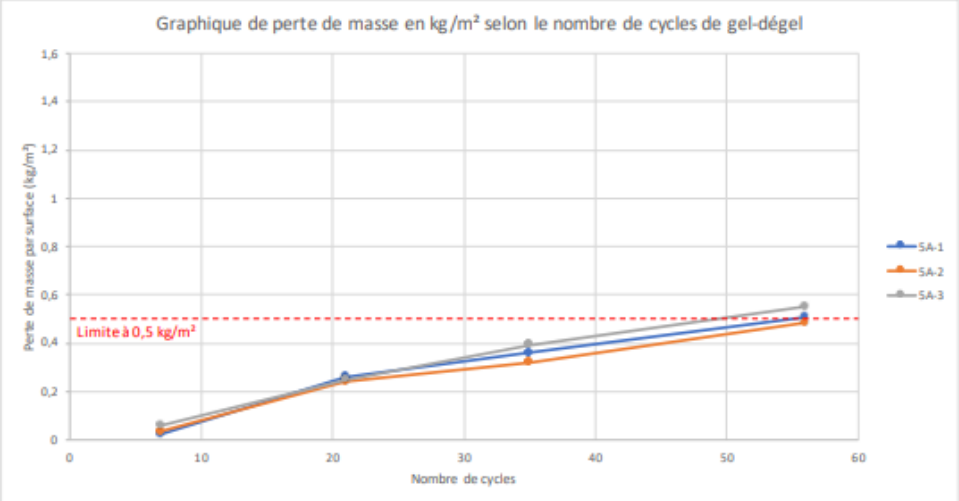
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 5A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	5A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	140 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	6,6%
Date de fabrication :	2020-06-30	**Masse volumique :**	2321 kg/m^3
W/C contact :	11h05	**Essai réalisé :**	E. Poiré
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

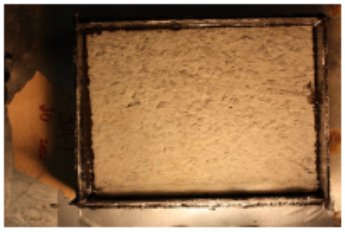
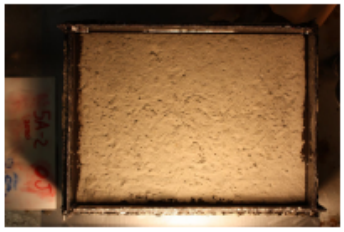
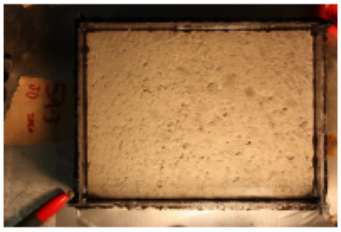
Résultats

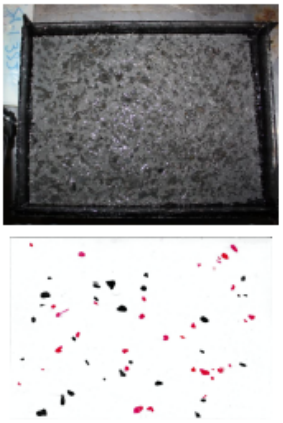
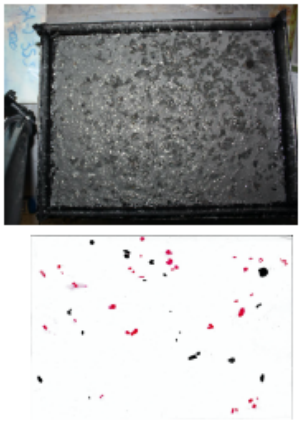
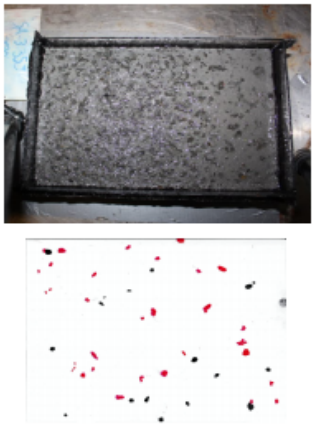
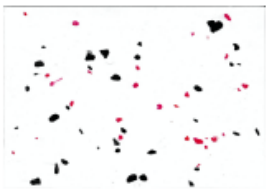
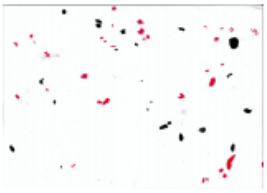
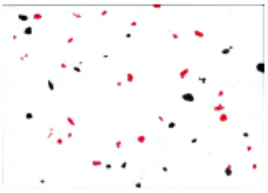
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
5A-1	0	0,0	553,0	2020-08-04				
5A-2	0	0,0	557,4					
5A-3	0	0,0	559,7					
5A-1	7	1,4	553,0	2020-08-11	1-A	1,4	0,0	**0,0**
5A-2	7	2,1	557,4		1-A	2,1	0,0	
5A-3	7	3,4	559,7		1-A	3,4	0,1	
5A-1	21	13,0	553,0	2020-08-25	3-B	14,4	0,3	**0,3**
5A-2	21	11,4	557,4		3-A	13,4	0,2	
5A-3	21	10,6	559,7		3-A	14,0	0,3	
5A-1	35	5,5	553,0	2020-09-22	3-B	19,9	0,4	**0,4**
5A-2	35	4,4	557,4		3-A	17,9	0,3	
5A-3	35	8,1	559,7		4-A	22,1	0,4	
5A-1	56	8,2	553,0	2020-10-13	4-B	28,1	0,5	**0,5**
5A-2	56	9,2	557,4		4-A	27,1	0,5	
5A-3	56	8,8	559,7		5-A	30,9	0,6	

Notes : Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre les cycles 21 et 35.



Version 2.1 - Sept 2020

	SA-1	SA-2	SA-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 0,20 % *Surface éclatement :* 0,42 % *Surface totale :* 0,62 %	*Surface dégarnie :* 0,30 % *Surface éclatement :* 0,20 % *Surface totale :* 0,50 %	*Surface dégarnie :* 0,37 % *Surface éclatement :* 0,22 % *Surface totale :* 0,59 %
21 cycles			
	Surface dégarnie : 0,99 % *Surface éclatement :* 1,09 % *Surface totale :* 2,08 %	*Surface dégarnie :* 0,65 % *Surface éclatement :* 0,39 % *Surface totale :* 1,04 %	*Surface dégarnie :* 1,12 % *Surface éclatement :* 0,39 % *Surface totale :* 1,50 %

	5A-1	5A-2	5A-3
35 cycles			
	Surface dégamie : 1,27 % Surface éclatement : 1,16 % Surface totale : 2,43 %	Surface dégamie : 0,89 % Surface éclatement : 0,58 % Surface totale : 1,47 %	Surface dégamie : 1,33 % Surface éclatement : 0,50 % Surface totale : 1,83 %
56 cycles			
	Surface dégamie : 1,02 % Surface éclatement : 2,00 % Surface totale : 3,02 %	Surface dégamie : 1,00 % Surface éclatement : 0,76 % Surface totale : 1,76 %	Surface dégamie : 1,43 % Surface éclatement : 0,86 % Surface totale : 2,29 %

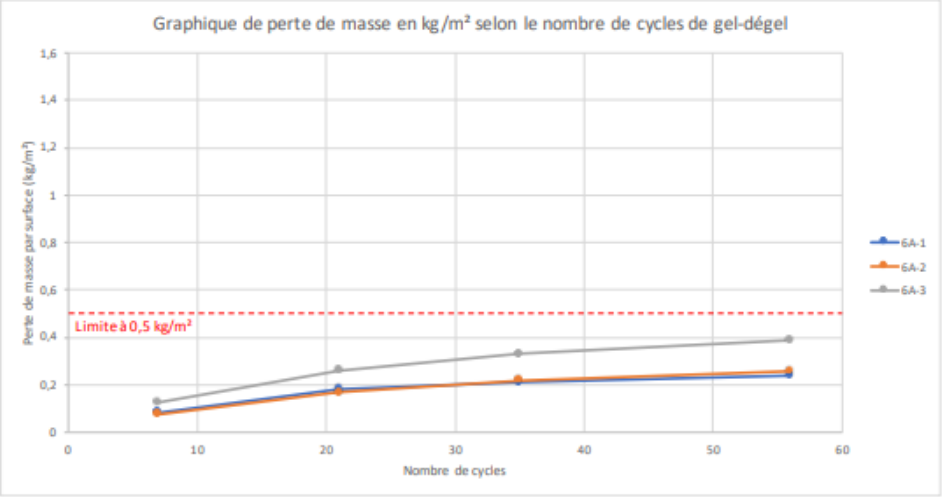
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 6A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	6A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	125 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	8,2%
Date de fabrication :	2019-07-31	**Masse volumique :**	2239 kg/m^3
W/C contact :	14h09	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

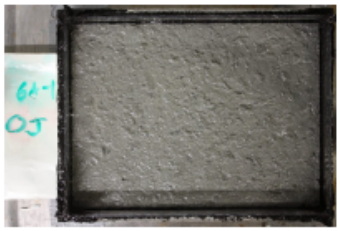
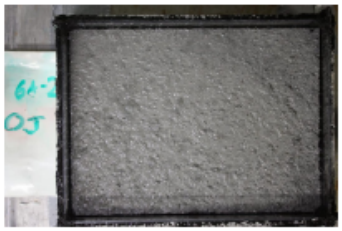
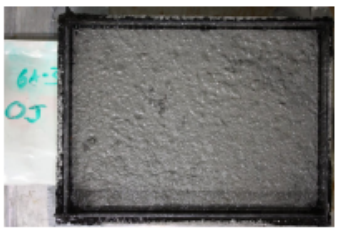
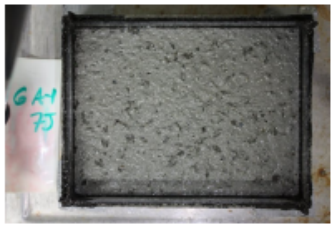
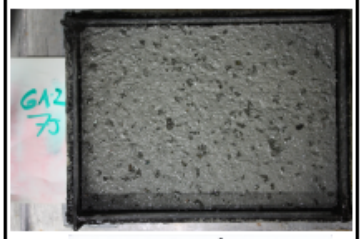
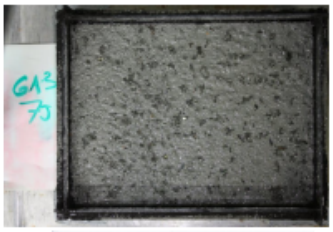
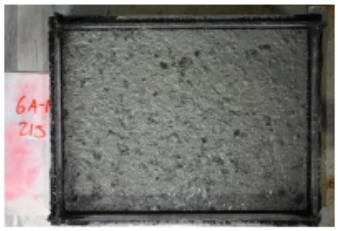
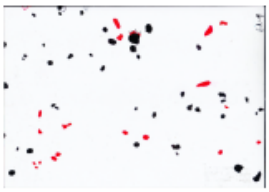
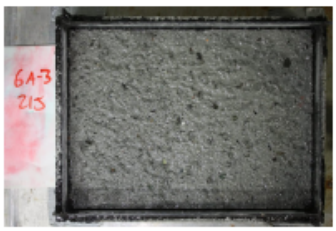
Résultats

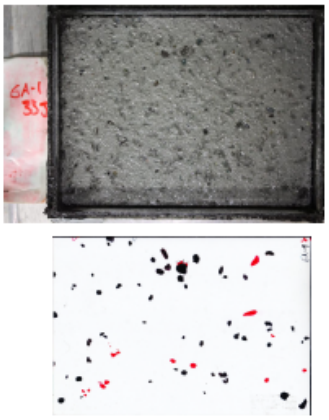
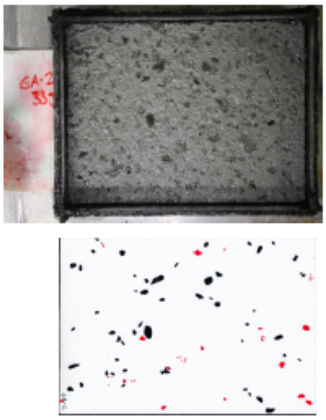
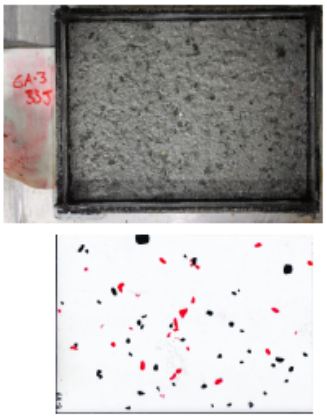
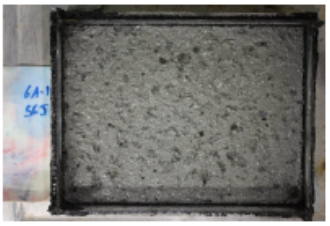
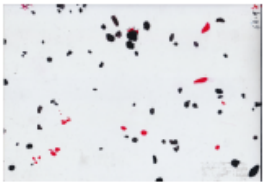
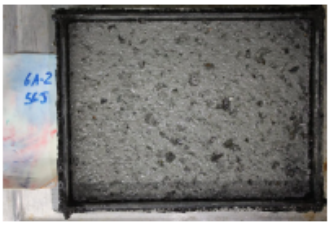
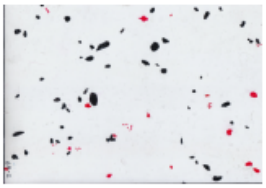
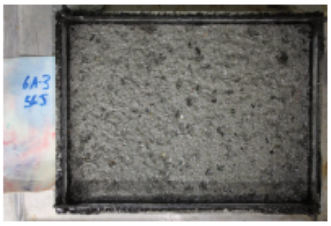
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
6A-1	0	0,0	555,9	2019-09-04				
6A-2	0	0,0	554,6					
6A-3	0	0,0	545,7					
6A-1	7	4,6	555,9	2019-09-11	1-A	4,6	0,1	**0,1**
6A-2	7	4,2	554,6		1-A	4,2	0,1	
6A-3	7	6,9	545,7		2-A	6,9	0,1	
6A-1	21	5,6	555,9	2019-10-02	3-B	10,2	0,2	**0,2**
6A-2	21	5,1	554,6		2-B	9,3	0,2	
6A-3	21	7,3	545,7		3-B	14,2	0,3	
6A-1	35	1,5	555,9	2019-10-16	3-B	11,7	0,2	**0,3**
6A-2	35	2,8	554,6		3-B	12,1	0,2	
6A-3	35	3,9	545,7		3-B	18,1	0,3	
6A-1	56	1,6	555,9	2019-11-06	3-C	13,3	0,2	**0,3**
6A-2	56	2,2	554,6		3-B	14,3	0,3	
6A-3	56	3,1	545,7		4-B	21,2	0,4	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	6A-1	6A-2	6A-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 0,77 % Surface éclatement : 0,74 % Surface totale : 1,50 %	Surface dégarnie : 0,30 % Surface éclatement : 0,55 % Surface totale : 0,86 %	Surface dégarnie : 0,82 % Surface éclatement : 0,52 % Surface totale : 1,34 %
21 cycles	 		
	Surface dégarnie : 1,73 % Surface éclatement : 1,63 % Surface totale : 3,36 %	Surface dégarnie : 1,22 % Surface éclatement : 1,25 % Surface totale : 2,47 %	Surface dégarnie : 1,69 % Surface éclatement : 1,21 % Surface totale : 2,90 %

	6A-1	6A-2	6A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 1,77 % *Surface éclatement :* 2,08 % *Surface totale :* 3,85 %	*Surface dégarnie :* 1,53 % *Surface éclatement :* 1,95 % *Surface totale :* 3,48 %	*Surface dégarnie :* 2,15 % *Surface éclatement :* 1,65 % *Surface totale :* 3,80 %
56 cycles	 	 	
	Surface dégarnie : 1,29 % *Surface éclatement :* 2,63 % *Surface totale :* 3,92 %	*Surface dégarnie :* 1,12 % *Surface éclatement :* 2,11 % *Surface totale :* 3,23 %	*Surface dégarnie :* 1,35 % *Surface éclatement :* 2,30 % *Surface totale :* 3,64 %

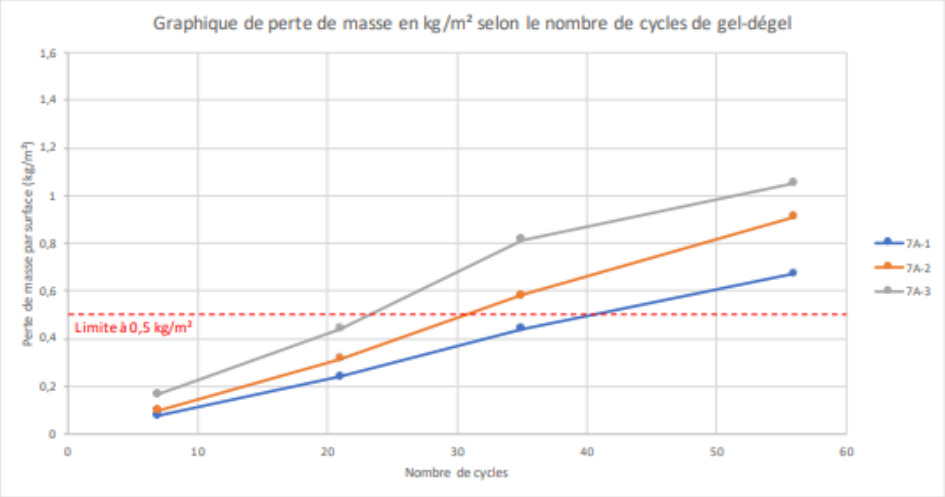
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 7A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	7A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	80 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	6,6%
Date de fabrication :	2019-07-31	**Masse volumique :**	2226 kg/m^3
W/C contact :	14h44	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

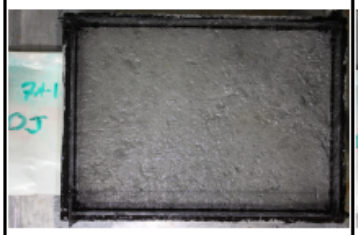
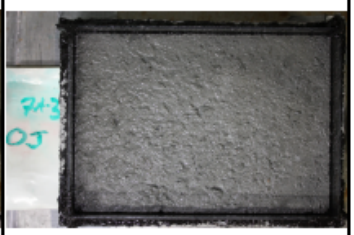
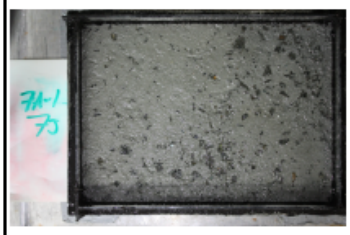
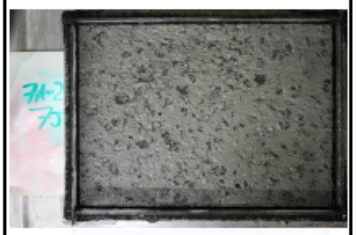
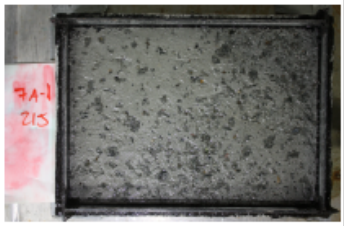
Résultats

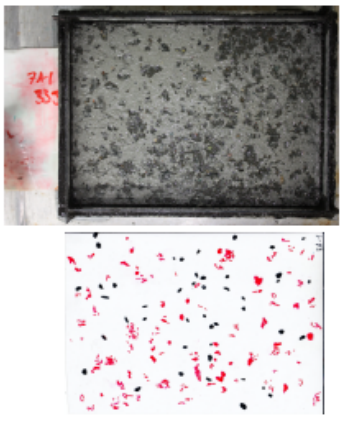
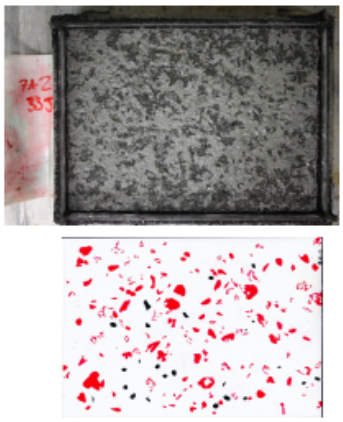
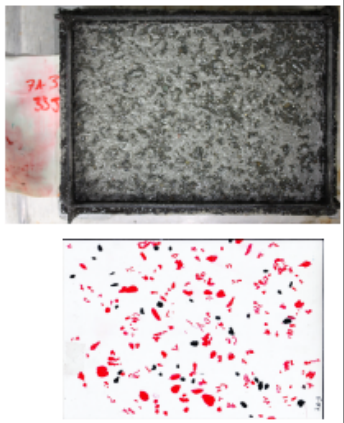
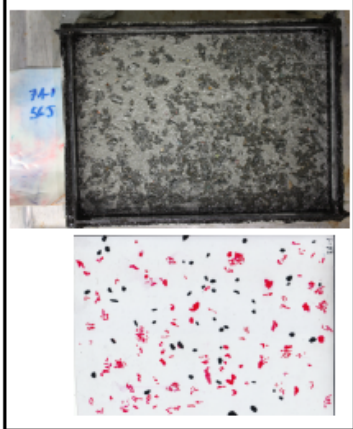
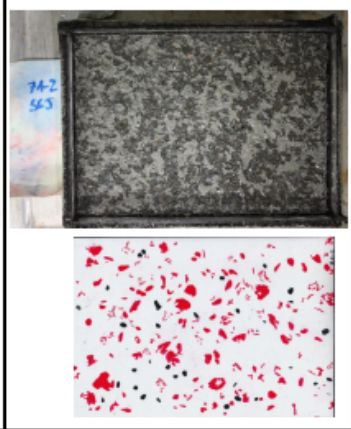
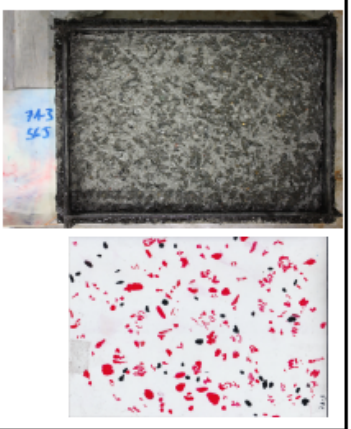
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
7A-1	0	0,0	549,2	2019-09-04				
7A-2	0	0,0	555,5					
7A-3	0	0,0	547,2					
7A-1	7	4,3	549,2	2019-09-11	1-A	4,3	0,1	
7A-2	7	5,5	555,5		2-A	5,5	0,1	0,1
7A-3	7	9,2	547,2		2-A	9,2	0,2	
7A-1	21	8,9	549,2	2019-10-02	3-A	13,2	0,2	
7A-2	21	12,1	555,5		3-A	17,6	0,3	0,3
7A-3	21	14,9	547,2		4-A	24,1	0,4	
7A-1	35	11,0	549,2	2019-10-16	4-B	24,2	0,4	
7A-2	35	14,8	555,5		5-A	32,4	0,6	0,6
7A-3	35	20,5	547,2		5-B	44,6	0,8	
7A-1	56	12,8	549,2	2019-11-06	5-B	37,0	0,7	
7A-2	56	18,2	555,5		5-B	50,6	0,9	0,9
7A-3	56	13,0	547,2		5-B	57,6	1,1	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	7A-1	7A-2	7A-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %	*Surface dégarnie :* 3,42 % *Surface éclatement :* 0,36 % *Surface totale :* 3,78 %	*Surface dégarnie :* 2,12 % *Surface éclatement :* 0,42 % *Surface totale :* 2,53 %
21 cycles			
	Surface dégarnie : 2,56 % *Surface éclatement :* 0,76 % *Surface totale :* 3,32 %	*Surface dégarnie :* 7,01 % *Surface éclatement :* 0,60 % *Surface totale :* 7,61 %	*Surface dégarnie :* 5,37 % *Surface éclatement :* 0,96 % *Surface totale :* 6,33 %

	7A-1	7A-2	7A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 3,72 % Surface éclatement : 1,15 % Surface totale : 4,87 %	Surface dégarnie : 7,98 % Surface éclatement : 0,69 % Surface totale : 8,68 %	Surface dégarnie : 7,42 % Surface éclatement : 1,25 % Surface totale : 8,67 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 4,35 % Surface éclatement : 1,47 % Surface totale : 5,82 %	Surface dégarnie : 9,76 % Surface éclatement : 1,09 % Surface totale : 10,84 %	Surface dégarnie : 7,53 % Surface éclatement : 1,49 % Surface totale : 9,02 %

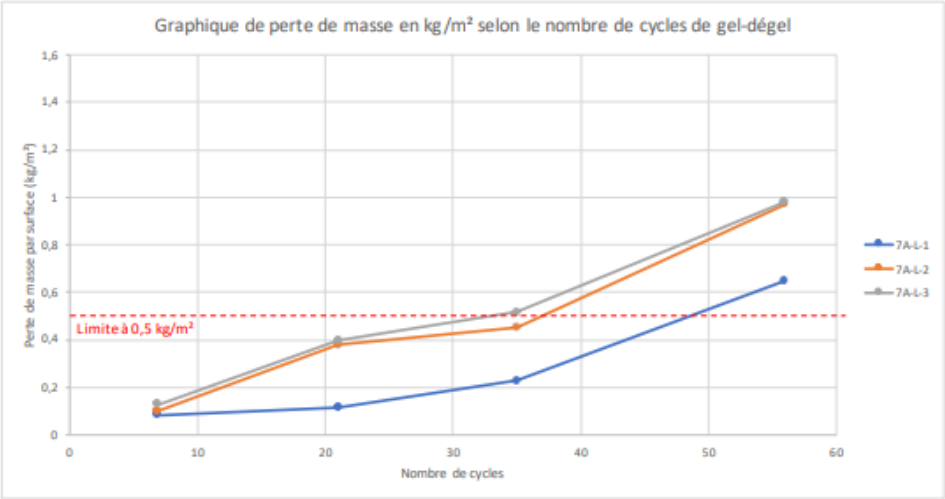
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 7A Lavé	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	7A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	140 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	5,0%
Date de fabrication :	2020-07-02	**Masse volumique :**	2269 kg/m^3
W/C contact :	11h18	**Essai réalisé :**	E. Poiré
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

Résultats

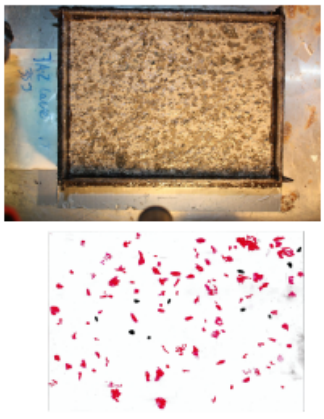
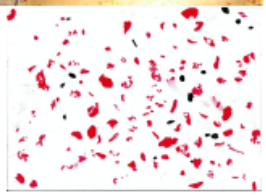
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
7A-L-1	0	0,0	573,0	2020-08-06				
7A-L-2	0	0,0	552,6					
7A-L-3	0	0,0	555,0					
7A-L-1	7	4,7	573,0	2020-08-13	1-A	4,7	0,1	**0,1**
7A-L-2	7	5,7	552,6		2-A	5,7	0,1	
7A-L-3	7	7,1	555,0		2-A	7,1	0,1	
7A-L-1	21	1,8	573,0	2020-08-27	2-A	6,6	0,1	**0,3**
7A-L-2	21	15,3	552,6		4-A	21,0	0,4	
7A-L-3	21	15,0	555,0		4-A	22,1	0,4	
7A-L-1	35	6,5	573,0	2020-09-24	3-A	13,1	0,2	**0,4**
7A-L-2	35	3,9	552,6		4-A	24,9	0,4	
7A-L-3	35	6,6	555,0		4-A	28,7	0,5	
7A-L-1	56	24,2	573,0	2020-10-15	5-A	37,2	0,6	**0,9**
7A-L-2	56	28,8	552,6		5-A	53,6	1,0	
7A-L-3	56	25,7	555,0		5-A	54,5	1,0	

Notes : Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre 7 et 21 cycles



Version 2.1 - Sept 2020

	7A-L-1	7A-L-2	7A-L-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 2,03 % *Surface éclatement :* 0,15 % *Surface totale :* 2,19 %	*Surface dégarnie :* 1,90 % *Surface éclatement :* 0,12 % *Surface totale :* 2,02 %	*Surface dégarnie :* 1,89 % *Surface éclatement :* 0,26 % *Surface totale :* 2,15 %
21 cycles	 	 	
	Surface dégarnie : 3,47 % *Surface éclatement :* 0,27 % *Surface totale :* 3,75 %	*Surface dégarnie :* 4,40 % *Surface éclatement :* 0,21 % *Surface totale :* 4,61 %	*Surface dégarnie :* 4,31 % *Surface éclatement :* 0,51 % *Surface totale :* 4,82 %

	7A-L-1	7A-L-2	7A-L-3
35 cycles			
	Surface dégamie : 4,45 % Surface éclatement : 0,46 % Surface totale : 4,90 %	Surface dégamie : 5,10 % Surface éclatement : 0,31 % Surface totale : 5,41 %	Surface dégamie : 5,53 % Surface éclatement : 0,73 % Surface totale : 6,26 %
56 cycles			
			
	Surface dégamie : 7,64 % Surface éclatement : 0,59 % Surface totale : 8,24 %	Surface dégamie : 8,62 % Surface éclatement : 0,53 % Surface totale : 9,14 %	Surface dégamie : 8,12 % Surface éclatement : 0,91 % Surface totale : 9,03 %

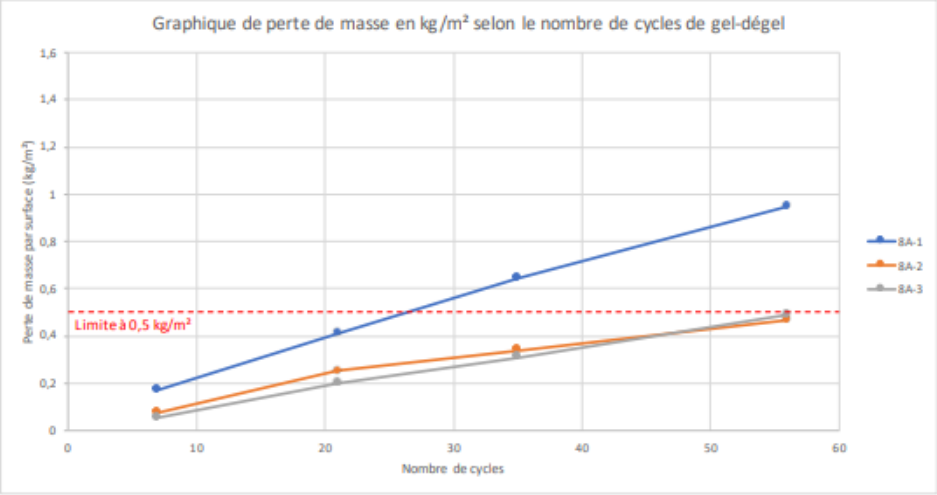
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 8A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	8A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	95 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	6,8%
Date de fabrication :	2019-07-31	**Masse volumique :**	2276 kg/m^3
W/C contact :	15h15	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

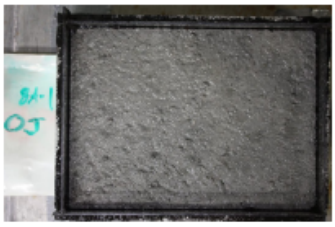
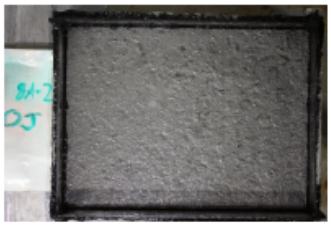
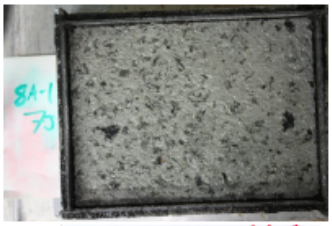
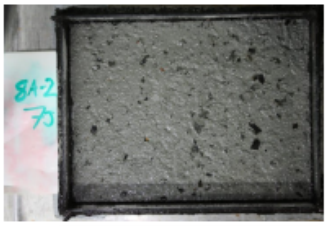
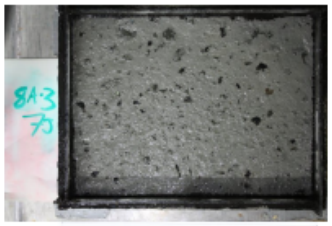
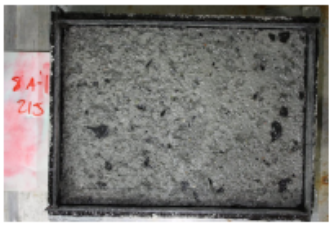
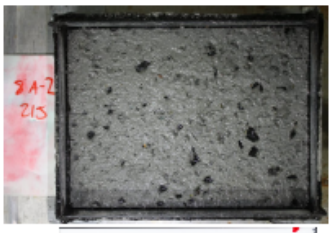
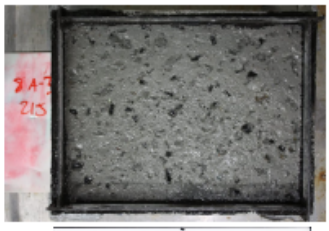
Résultats

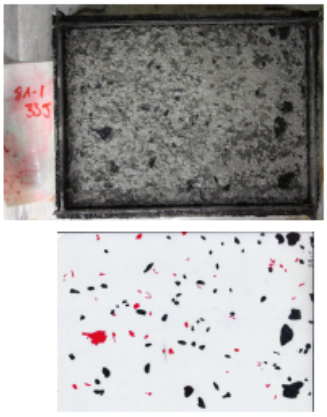
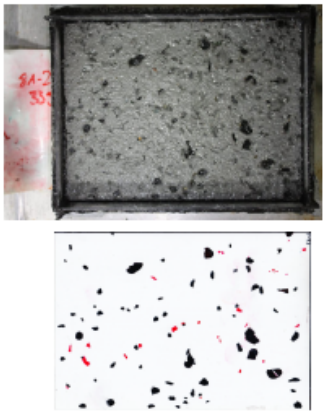
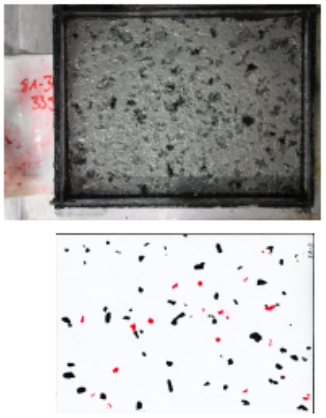
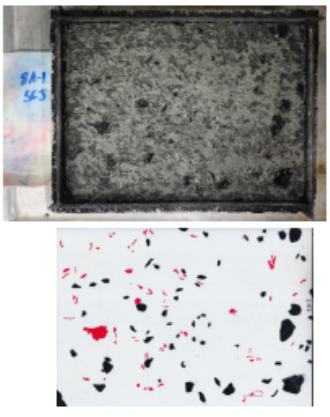
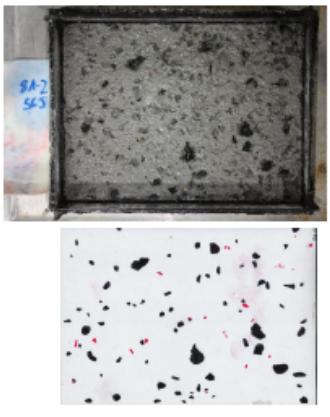
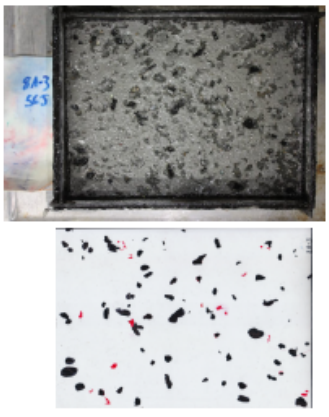
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
8A-1	0	0,0	553,2	2019-09-04				
8A-2	0	0,0	556,2					
8A-3	0	0,0	548,7					
8A-1	7	9,5	553,2	2019-09-11	2-A	9,5	0,2	**0,1**
8A-2	7	4,2	556,2		1-B	4,2	0,1	
8A-3	7	3,0	548,7		1-B	3,0	0,1	
8A-1	21	13,2	553,2	2019-10-02	4-B	22,7	0,4	**0,3**
8A-2	21	9,9	556,2		3-C	14,1	0,3	
8A-3	21	8,1	548,7		3-B	11,1	0,2	
8A-1	35	13,1	553,2	2019-10-16	5-C	35,8	0,6	**0,4**
8A-2	35	4,8	556,2		3-C	18,9	0,3	
8A-3	35	5,8	548,7		3-C	16,9	0,3	
8A-1	56	16,7	553,2	2019-11-06	5-C	52,5	0,9	**0,6**
8A-2	56	7,1	556,2		4-C	26,0	0,5	
8A-3	56	10,0	548,7		4-C	26,9	0,5	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	8A-1	8A-2	8A-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégamie : 3,35 % *Surface éclatement :* 0,71 % *Surface totale :* 4,06 %	*Surface dégamie :* 0,88 % *Surface éclatement :* 1,07 % *Surface totale :* 1,96 %	*Surface dégamie :* 0,50 % *Surface éclatement :* 1,07 % *Surface totale :* 1,57 %
21 cycles			
	Surface dégamie : 2,27 % *Surface éclatement :* 2,49 % *Surface totale :* 4,76 %	*Surface dégamie :* 1,38 % *Surface éclatement :* 3,05 % *Surface totale :* 4,43 %	*Surface dégamie :* 1,37 % *Surface éclatement :* 2,17 % *Surface totale :* 3,54 %

	8A-1	8A-2	8A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 2,09 % Surface éclatement : 4,13 % Surface totale : 6,22 %	Surface dégarnie : 1,47 % Surface éclatement : 3,62 % Surface totale : 5,09 %	Surface dégarnie : 1,49 % Surface éclatement : 2,66 % Surface totale : 4,14 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 1,73 % Surface éclatement : 5,31 % Surface totale : 7,04 %	Surface dégarnie : 0,74 % Surface éclatement : 4,60 % Surface totale : 5,34 %	Surface dégarnie : 0,97 % Surface éclatement : 5,04 % Surface totale : 6,01 %

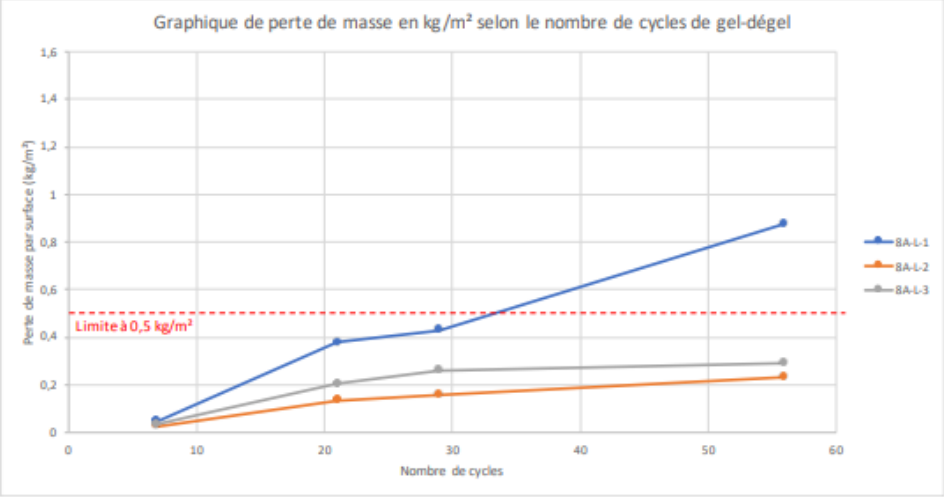
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 8A Lavé	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	8A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	150 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	6,8%
Date de fabrication :	2020-07-28	**Masse volumique :**	2229 kg/m^3
W/C contact :	11h35	**Essai réalisé :**	E. Poiré
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

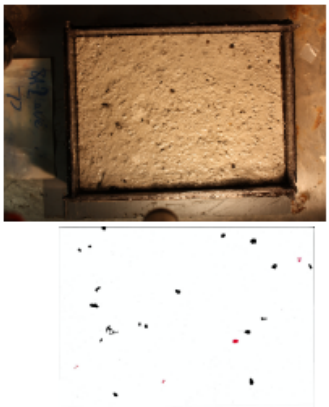
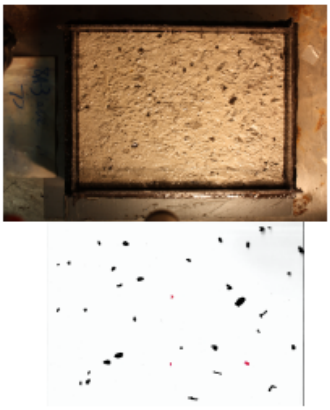
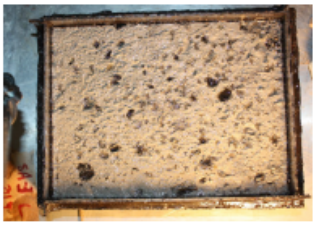
Résultats

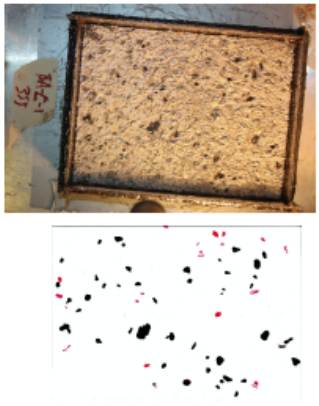
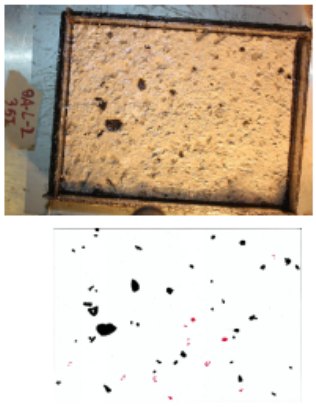
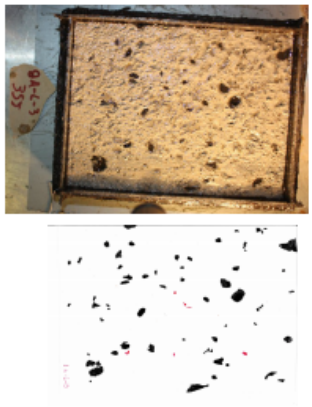
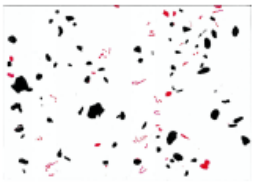
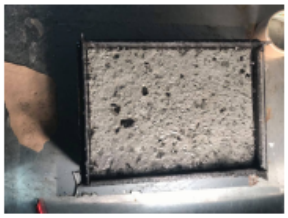
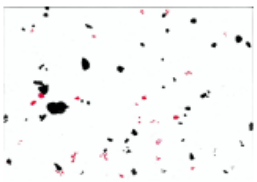
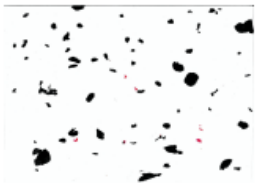
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
8A-L-1	0	0,0	542,5	2020-09-03				
8A-L-2	0	0,0	548,2					
8A-L-3	0	0,0	541,5					
8A-L-1	7	2,6	542,5	2020-09-24	1-A	2,6	0,0	**0,0**
8A-L-2	7	1,4	548,2		1-A	1,4	0,0	
8A-L-3	7	2,0	541,5		1-A	2,0	0,0	
8A-L-1	21	17,9	542,5	2020-10-08	4-B	20,5	0,4	**0,2**
8A-L-2	21	5,9	548,2		2-B	7,3	0,1	
8A-L-3	21	9,0	541,5		3-B	11,0	0,2	
8A-L-1	29	2,7	542,5	2020-10-22	4-C	23,3	0,4	**0,3**
8A-L-2	29	1,4	548,2		2-B	8,8	0,2	
8A-L-3	29	3,1	541,5		3-B	14,1	0,3	
8A-L-1	56	24,3	542,5	2020-11-18	5-C	47,6	0,9	**0,5**
8A-L-2	56	4,0	548,2		3-C	12,7	0,2	
8A-L-3	56	1,7	541,5		3-C	15,8	0,3	

Notes : Mesures réalisées à 29 cycles au lieu de 35 cycles occasionnées par un bris de la chambre durant 6 jours
Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre 0 et 7 cycles



Version 2.1 - Sept 2020

	8A-L-1	8A-L-2	8A-L-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégamie : 0,43 % *Surface éclatement :* 0,22 % *Surface totale :* 0,65 %	*Surface dégamie :* 0,35 % *Surface éclatement :* 0,44 % *Surface totale :* 0,79 %	*Surface dégamie :* 0,35 % *Surface éclatement :* 0,86 % *Surface totale :* 1,21 %
21 cycles			
	Surface dégamie : - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %	*Surface dégamie :* - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %	*Surface dégamie :* - % *Surface éclatement :* - % *Surface totale :* - %

	8A-L-1	8A-L-2	8A-L-3
29 cycles			
	Surface dégamie : 0,74 % Surface éclatement : 2,54 % Surface totale : 3,28 %	Surface dégamie : 0,48 % Surface éclatement : 1,64 % Surface totale : 2,12 %	Surface dégamie : 0,53 % Surface éclatement : 1,17 % Surface totale : 1,70 %
56 cycles		 	
	Surface dégamie : 0,88 % Surface éclatement : 4,45 % Surface totale : 5,33 %	Surface dégamie : 0,56 % Surface éclatement : 2,05 % Surface totale : 2,61 %	Surface dégamie : 0,79 % Surface éclatement : 3,95 % Surface totale : 4,74 %

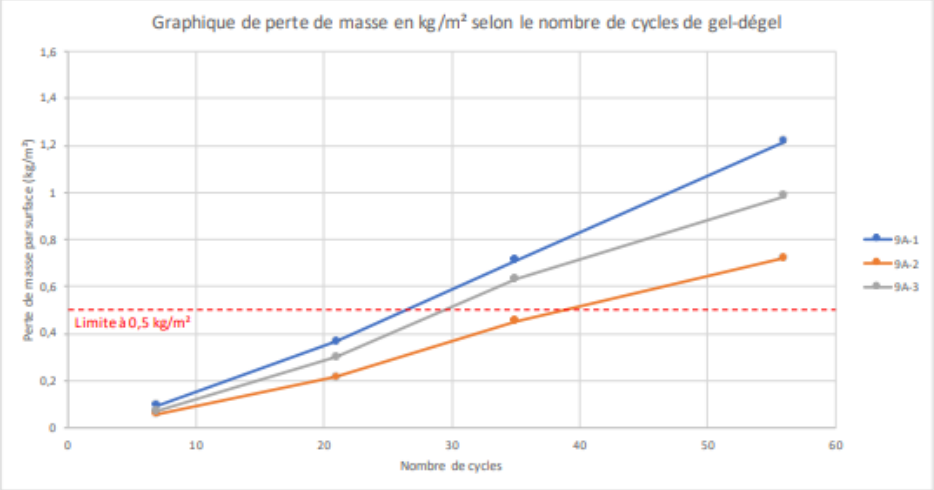
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 9A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	9A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	95 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	4,6%
Date de fabrication :	2019-09-18	**Masse volumique :**	2344 kg/m^3
W/C contact :	14h00	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

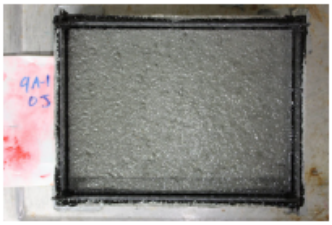
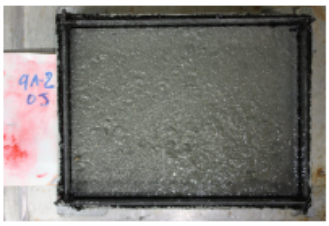
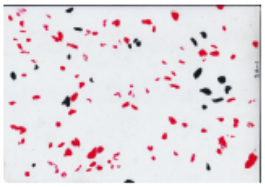
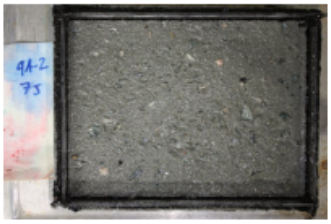
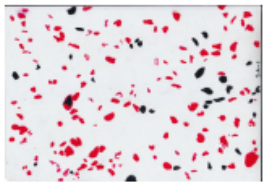
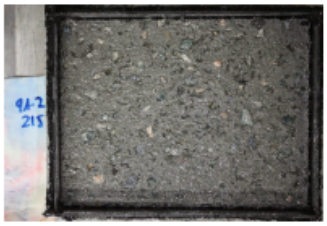
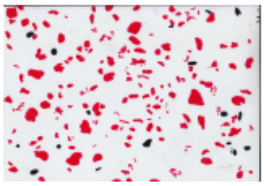
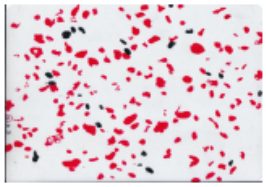
Résultats

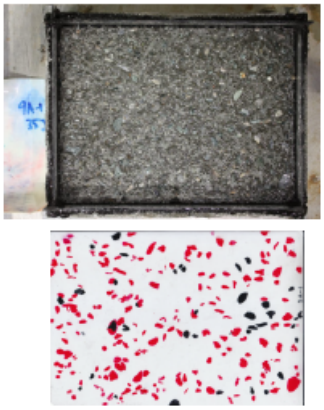
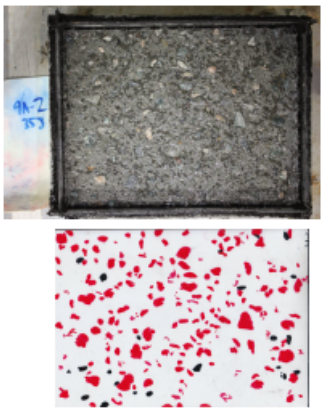
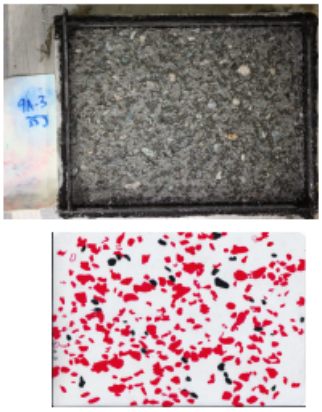
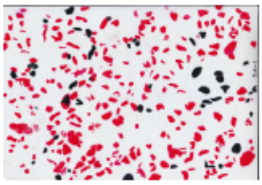
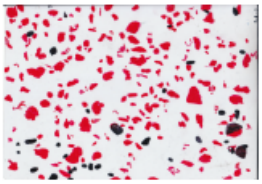
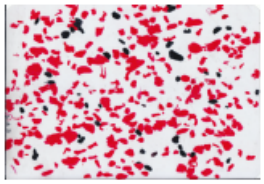
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
9A-1	0	0,0	541,9	2019-10-23				
9A-2	0	0,0	550,8					
9A-3	0	0,0	539,0					
9A-1	7	5,1	541,9	2019-10-30	2-B	5,1	0,1	**0,1**
9A-2	7	3,2	550,8		1-A	3,2	0,1	
9A-3	7	3,9	539,0		1-A	3,9	0,1	
9A-1	21	14,8	541,9	2019-11-13	3-B	19,9	0,4	**0,3**
9A-2	21	8,7	550,8		3-A	11,9	0,2	
9A-3	21	12,3	539,0		3-B	16,2	0,3	
9A-1	35	18,7	541,9	2019-11-27	5-B	38,6	0,7	**0,6**
9A-2	35	13,1	550,8		4-B	25,0	0,5	
9A-3	35	17,8	539,0		5-B	34,0	0,6	
9A-1	56	27,3	541,9	2019-12-18	5-C	65,9	1,2	**1,0**
9A-2	56	14,8	550,8		5-B	39,8	0,7	
9A-3	56	19,0	539,0		5-C	53,0	1,0	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	9A-1	9A-2	9A-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 5,34 % Surface éclatement : 1,32 % Surface totale : 6,66 %	Surface dégarnie : 6,80 % Surface éclatement : 0,38 % Surface totale : 7,18 %	Surface dégarnie : 6,27 % Surface éclatement : 0,73 % Surface totale : 7,00 %
21 cycles		 	
	Surface dégarnie : 8,43 % Surface éclatement : 2,02 % Surface totale : 10,45 %	Surface dégarnie : 12,05 % Surface éclatement : 0,89 % Surface totale : 12,94 %	Surface dégarnie : 12,05 % Surface éclatement : 1,18 % Surface totale : 13,23 %

	9A-1	9A-2	9A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 11,36 % Surface éclatement : 2,40 % Surface totale : 13,77 %	Surface dégarnie : 15,09 % Surface éclatement : 1,26 % Surface totale : 16,34 %	Surface dégarnie : 22,51 % Surface éclatement : 2,17 % Surface totale : 24,68 %
56 cycles			
			
	Surface dégarnie : 16,64 % Surface éclatement : 3,19 % Surface totale : 19,82 %	Surface dégarnie : 16,12 % Surface éclatement : 2,43 % Surface totale : 18,55 %	Surface dégarnie : 24,60 % Surface éclatement : 2,76 % Surface totale : 27,36 %

CRIB — UNIVERSITÉ LAVAL

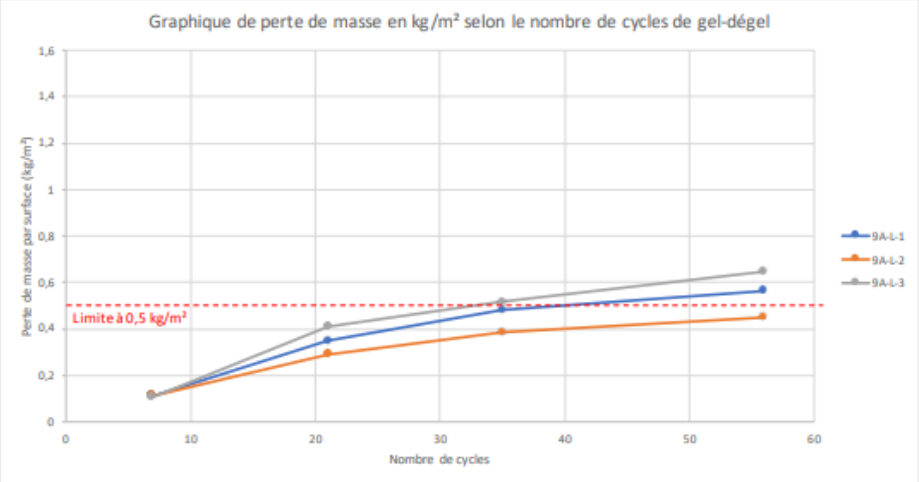
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 9A Lavé	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	9A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	75 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	5,9%
Date de fabrication :	2020-07-02	**Masse volumique :**	2304 kg/m^3
W/C contact :	11h51	**Essai réalisé :**	E. Poiré
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

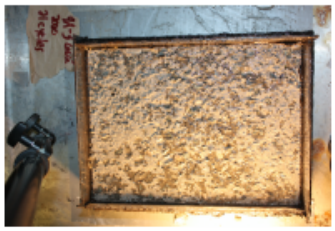
Résultats

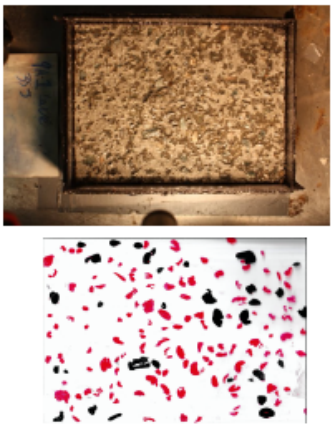
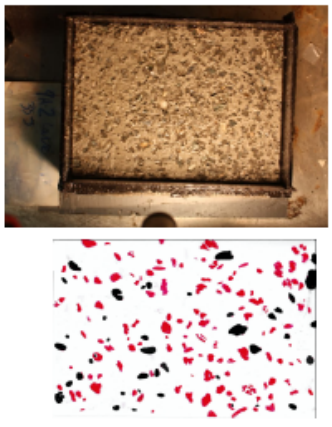
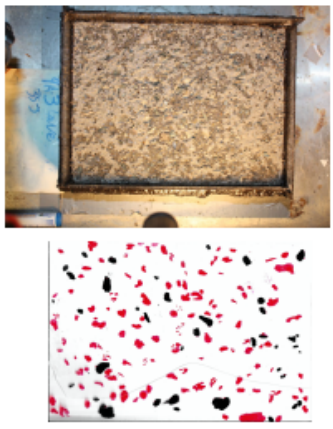
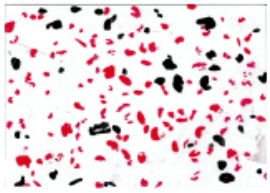
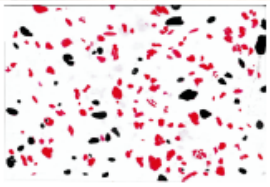
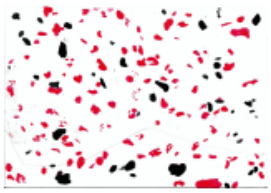
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
9A-L-1	0	0,0	552,8	2020-08-06				
9A-L-2	0	0,0	532,2					
9A-L-3	0	0,0	573,2					
9A-L-1	7	6,2	552,8	2020-08-13	2-A	6,2	0,1	0,1
9A-L-2	7	6,0	532,2		2-A	6,0	0,1	
9A-L-3	7	6,2	573,2		2-A	6,2	0,1	
9A-L-1	21	13,1	552,8	2020-08-27	3-A	19,3	0,3	0,4
9A-L-2	21	9,5	532,2		3-A	15,5	0,3	
9A-L-3	21	17,3	573,2		4-A	23,5	0,4	
9A-L-1	35	7,2	552,8	2020-09-24	4-C	26,5	0,5	0,5
9A-L-2	35	5,0	532,2		4-C	20,5	0,4	
9A-L-3	35	6,2	573,2		4-C	29,7	0,5	
9A-L-1	56	4,6	552,8	2020-10-15	5-C	31,2	0,6	0,6
9A-L-2	56	3,4	532,2		4-C	23,9	0,4	
9A-L-3	56	7,4	573,2		5-C	37,1	0,6	

Notes : Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre 7 et 21 cycles



Version 2.1 - Sept 2020

	9A-L-1	9A-L-2	9A-L-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 6,20 % *Surface éclatement :* 0,43 % *Surface totale :* 6,62 %	*Surface dégarnie :* 6,39 % *Surface éclatement :* 0,32 % *Surface totale :* 6,72 %	*Surface dégarnie :* 4,70 % *Surface éclatement :* 0,42 % *Surface totale :* 5,12 %
21 cycles	 		
	Surface dégarnie : 9,46 % *Surface éclatement :* 0,71 % *Surface totale :* 10,17 %	*Surface dégarnie :* 9,83 % *Surface éclatement :* 0,63 % *Surface totale :* 10,46 %	*Surface dégarnie :* 8,04 % *Surface éclatement :* 0,70 % *Surface totale :* 8,74 %

	9A-L-1	9A-L-2	9A-L-3
35 cycles			
	Surface dégamie : 9,60 % *Surface éclatement :* 4,37 % *Surface totale :* 13,96 %	*Surface dégamie :* 9,26 % *Surface éclatement :* 3,11 % *Surface totale :* 12,36 %	*Surface dégamie :* 7,77 % *Surface éclatement :* 3,18 % *Surface totale :* 10,94 %
56 cycles			
	Surface dégamie : 9,09 % *Surface éclatement :* 4,76 % *Surface totale :* 13,85 %	*Surface dégamie :* 8,86 % *Surface éclatement :* 3,90 % *Surface totale :* 12,76 %	*Surface dégamie :* 7,84 % *Surface éclatement :* 3,15 % *Surface totale :* 10,99 %

Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

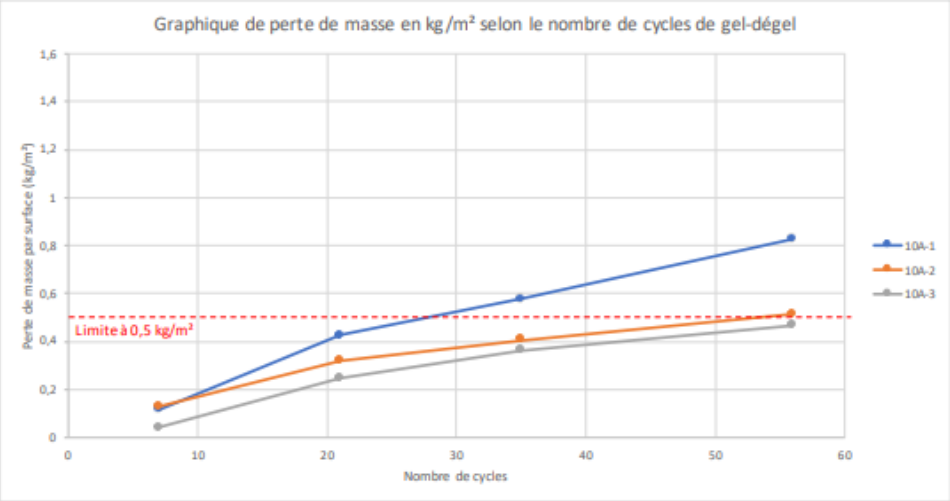
Mélange : Mix 10A
Source du granulat : 10A
Projet/Contrat : MTQ - écaillage
Type de béton : Béton coulé
Batch No : 1
Date de fabrication : 2020-06-30
W/C contact : 11h45
Historique de cure : 100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)

Norme : BNQ 2621-905 / 2018
Consolidation : Bourroir
Dimension dalle : 300 mm x 230 mm
Affaissement : 145 mm
Teneur en air : 6,8%
Masse volumique : 2282 kg/m^3
Essai réalisé : E. Poiré
A. De Almeida Rodrigues

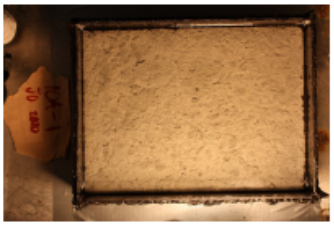
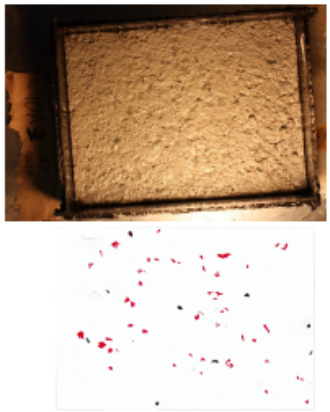
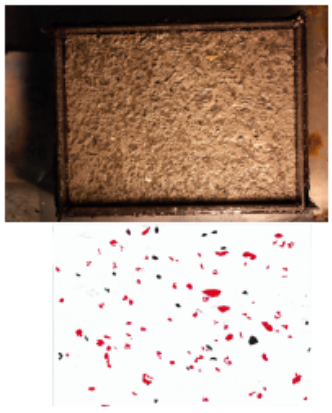
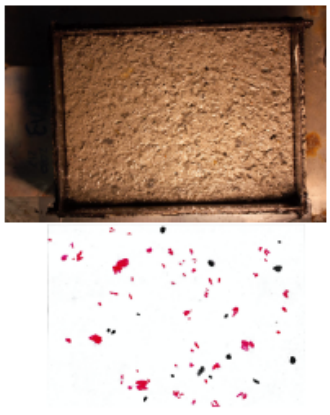
Résultats

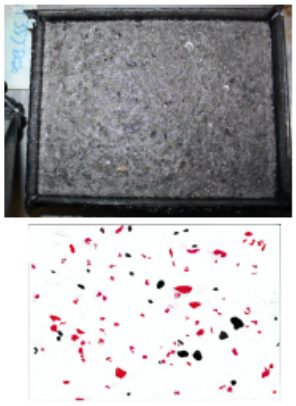
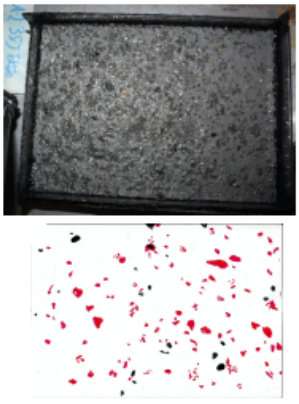
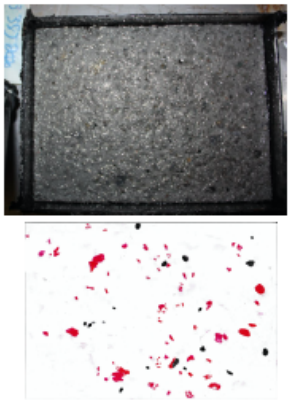
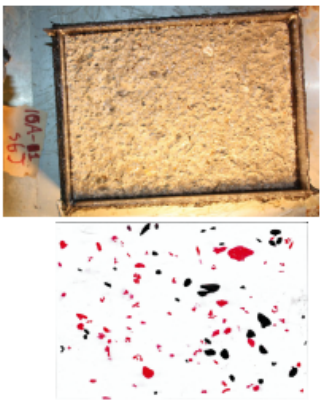
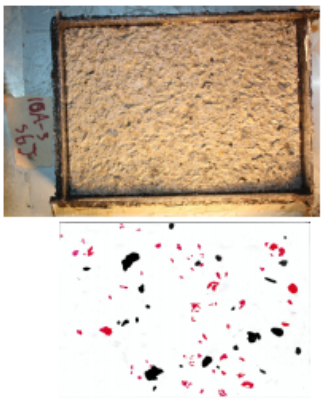
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
10A-1	0	0,0	557,6	2020-08-04				
10A-2	0	0,0	558,3					
10A-3	0	0,0	554,0					
10A-1	7	6,5	557,6	2020-08-11	2-A	6,5	0,1	**0,1**
10A-2	7	7,2	558,3		2-A	7,2	0,1	
10A-3	7	2,4	554,0		1-A	2,4	0,0	
10A-1	21	17,4	557,6	2020-08-25	4-B	23,9	0,4	**0,3**
10A-2	21	10,8	558,3		3-A	18,0	0,3	
10A-3	21	11,2	554,0		3-A	13,6	0,2	
10A-1	35	8,2	557,6	2020-09-22	5-B	32,1	0,6	**0,4**
10A-2	35	4,6	558,3		4-A	22,7	0,4	
10A-3	35	6,5	554,0		4-A	20,1	0,4	
10A-1	56	14,1	557,6	2020-10-13	5-B	46,2	0,8	**0,6**
10A-2	56	6,1	558,3		4-A	28,7	0,5	
10A-3	56	5,8	554,0		4-B	25,9	0,5	

Notes : Pause des essais durant 14 jours (COVID) entre les cycles 21 et 35.



Version 2.1 - Sept 2020

	10A-1	10A-2	10A-3
0 cycles			
7 cycles	 Surface dégamie : 0,91 % Surface éclatement : 0,17 % Surface totale : 1,08 %	 Surface dégamie : 1,66 % Surface éclatement : 0,05 % Surface totale : 1,71 %	 Surface dégamie : 0,28 % Surface éclatement : 0,14 % Surface totale : 0,42 %
21 cycles	 Surface dégamie : 2,74 % Surface éclatement : 0,54 % Surface totale : 3,28 %	 Surface dégamie : 3,39 % Surface éclatement : 0,35 % Surface totale : 3,74 %	 Surface dégamie : 1,96 % Surface éclatement : 0,53 % Surface totale : 2,49 %

	10A-1	10A-2	10A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 3,11 % Surface éclatement : 1,28 % Surface totale : 4,39 %	Surface dégarnie : 4,23 % Surface éclatement : 0,61 % Surface totale : 4,84 %	Surface dégarnie : 2,83 % Surface éclatement : 0,57 % Surface totale : 3,40 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 3,44 % Surface éclatement : 2,49 % Surface totale : 5,92 %	Surface dégarnie : 4,39 % Surface éclatement : 1,00 % Surface totale : 5,39 %	Surface dégarnie : 2,09 % Surface éclatement : 2,18 % Surface totale : 4,27 %

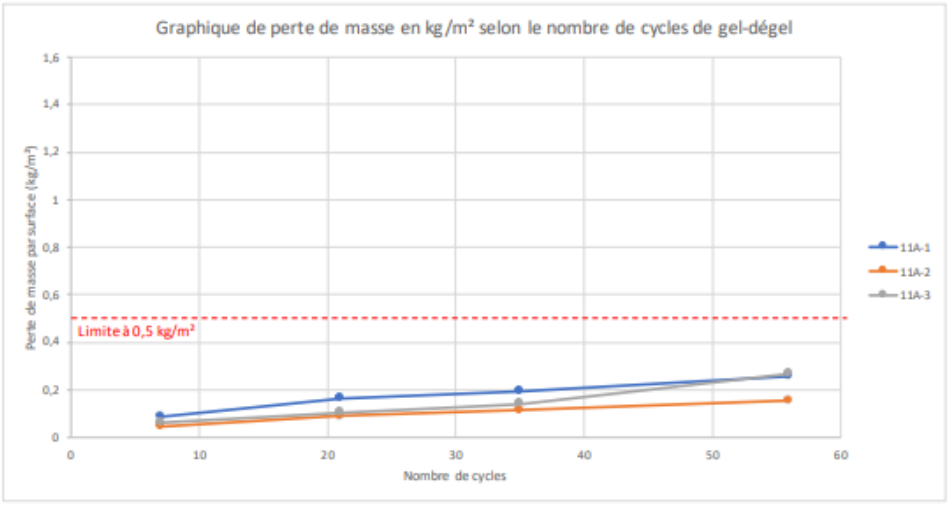
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 11A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	11A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	135 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	7,4%
Date de fabrication :	2019-08-20	**Masse volumique :**	2266 kg/m^3
W/C contact :	9h30	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

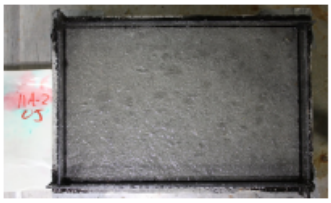
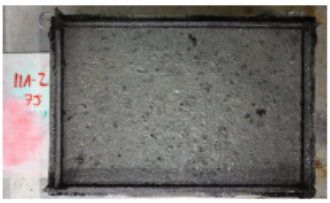
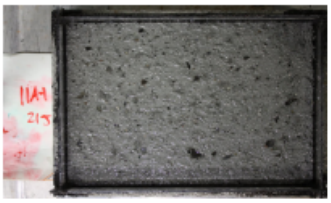
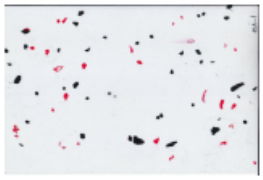
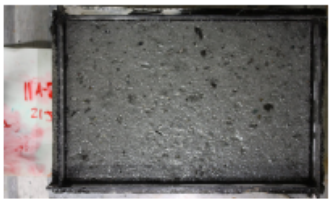
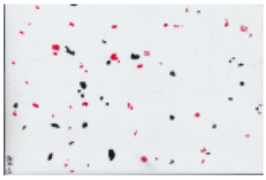
Résultats

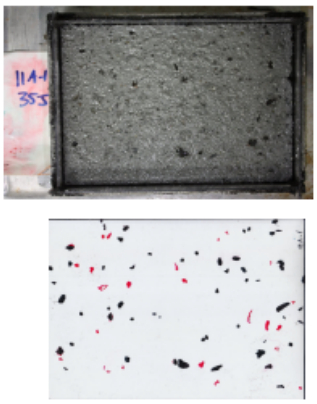
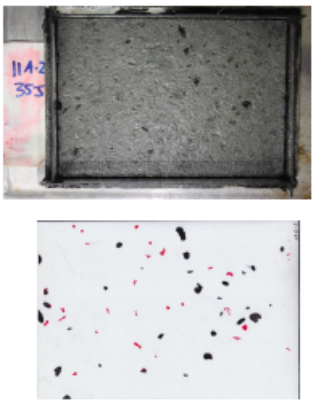
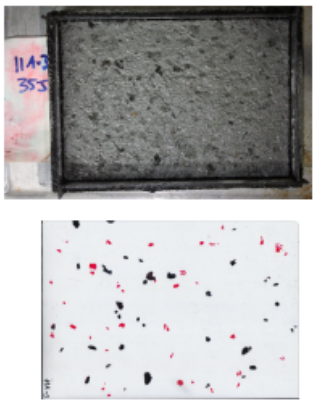
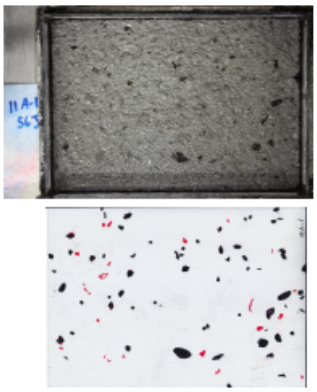
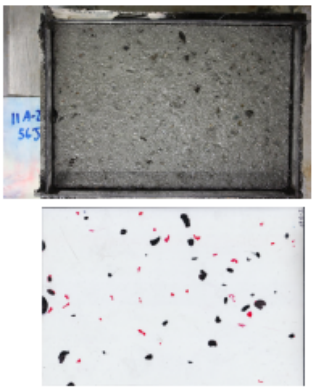
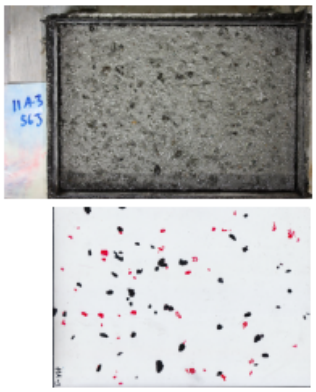
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
11A-1	0	0,0	551,9	2019-09-24				
11A-2	0	0,0	546,7					
11A-3	0	0,0	545,4					
11A-1	7	4,8	551,9	2019-10-01	1-A	4,8	0,1	
11A-2	7	2,5	546,7		1-A	2,5	0,0	**0,1**
11A-3	7	3,4	545,4		1-A	3,4	0,1	
11A-1	21	4,3	551,9	2019-10-15	2-B	9,1	0,2	
11A-2	21	2,4	546,7		1-A	4,9	0,1	**0,1**
11A-3	21	2,4	545,4		2-A	5,8	0,1	
11A-1	35	1,6	551,9	2019-10-29	3-B	10,7	0,2	
11A-2	35	1,4	546,7		2-B	6,3	0,1	**0,2**
11A-3	35	1,9	545,4		2-B	7,7	0,1	
11A-1	56	3,5	551,9	2019-11-19	3-C	14,2	0,3	
11A-2	56	2,2	546,7		2-B	8,5	0,2	**0,2**
11A-3	56	6,9	545,4		3-B	14,6	0,3	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	11A-1	11A-2	11A-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 1,67 % Surface éclatement : 0,38 % Surface totale : 2,04 %	Surface dégarnie : 1,12 % Surface éclatement : 0,29 % Surface totale : 1,41 %	Surface dégarnie : 1,23 % Surface éclatement : 0,42 % Surface totale : 1,65 %
21 cycles	 		
	Surface dégarnie : 1,68 % Surface éclatement : 1,47 % Surface totale : 3,15 %	Surface dégarnie : 1,26 % Surface éclatement : 0,73 % Surface totale : 1,99 %	Surface dégarnie : 1,45 % Surface éclatement : 0,96 % Surface totale : 2,41 %

	11A-1	11A-2	11A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 1,34 % *Surface éclatement :* 2,04 % *Surface totale :* 3,37 %	*Surface dégarnie :* 1,23 % *Surface éclatement :* 1,31 % *Surface totale :* 2,54 %	*Surface dégarnie :* 1,40 % *Surface éclatement :* 1,44 % *Surface totale :* 2,84 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 1,17 % *Surface éclatement :* 2,83 % *Surface totale :* 4,00 %	*Surface dégarnie :* 1,13 % *Surface éclatement :* 1,78 % *Surface totale :* 2,91 %	*Surface dégarnie :* 1,52 % *Surface éclatement :* 2,01 % *Surface totale :* 3,54 %

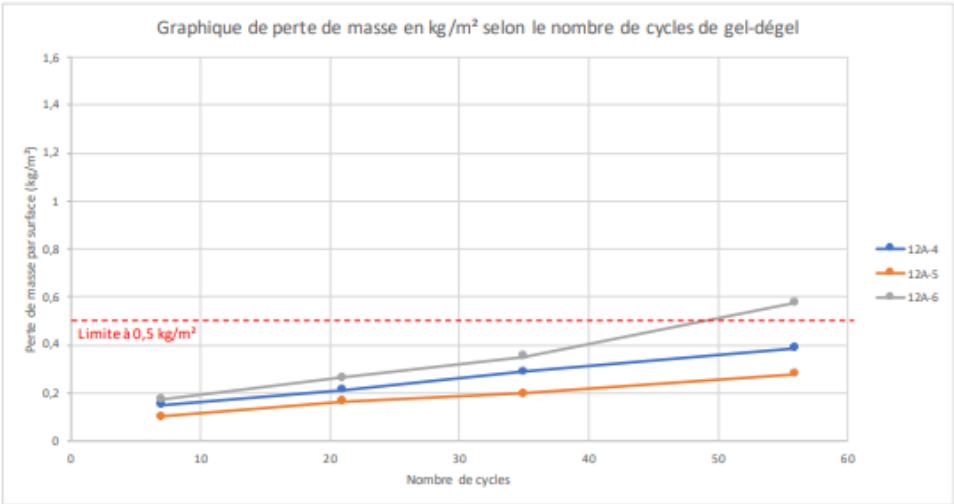
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 12A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	12A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	Béton coulé	**Affaissement :**	155 mm
Batch No :	2	**Teneur en air :**	8,0%
Date de fabrication :	2019-09-04	**Masse volumique :**	2295 kg/m^3
W/C contact :	13h30	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

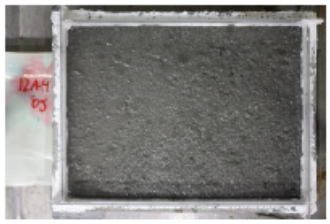
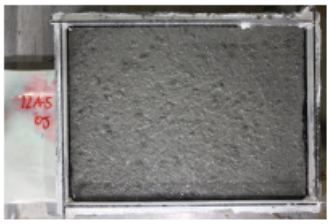
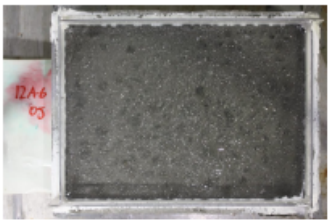
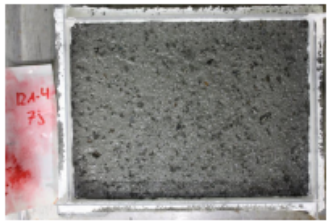
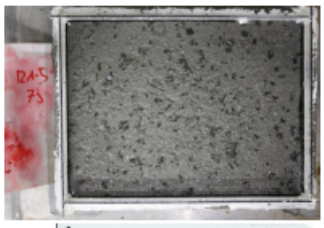
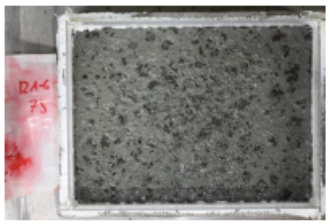
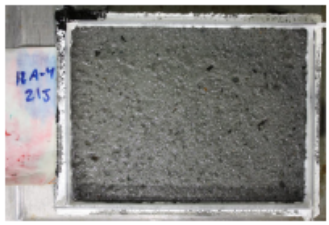
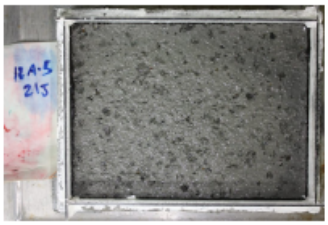
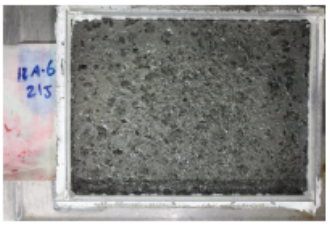
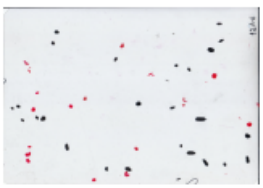
Résultats

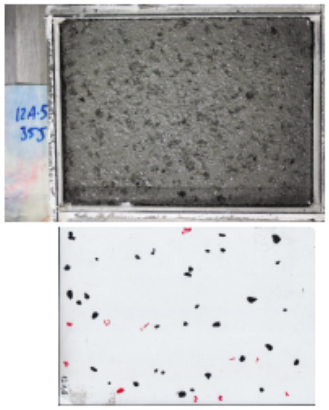
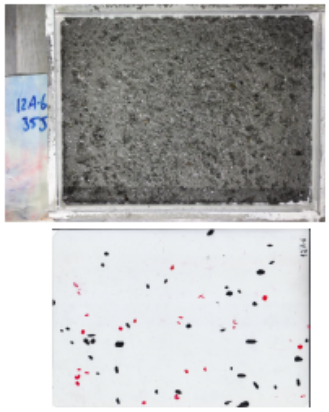
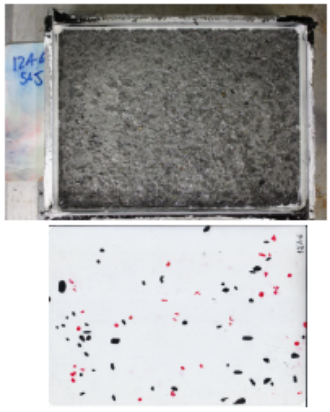
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
12A-4	0	0,0	536,1	2019-10-09				
12A-5	0	0,0	543,2					
12A-6	0	0,0	542,6					
12A-4	7	8,0	536,1	2019-10-16	2-A	8,0	0,1	**0,1**
12A-5	7	5,6	543,2		2-A	5,6	0,1	
12A-6	7	9,4	542,6		2-A	9,4	0,2	
12A-4	21	3,4	536,1	2019-10-30	3-B	11,4	0,2	**0,2**
12A-5	21	3,4	543,2		2-B	9,0	0,2	
12A-6	21	5,0	542,6		3-A	14,4	0,3	
12A-4	35	4,1	536,1	2019-11-13	3-B	15,5	0,3	**0,3**
12A-5	35	1,7	543,2		3-B	10,7	0,2	
12A-6	35	4,6	542,6		3-B	19,0	0,4	
12A-4	56	5,2	536,1	2019-12-04	4-B	20,7	0,4	**0,4**
12A-5	56	4,4	543,2		3-B	15,1	0,3	
12A-6	56	12,3	542,6		5-B	31,3	0,6	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	12A-4	12A-5	12A-6
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 0,34 % Surface éclatement : 0,75 % Surface totale : 1,10 %	Surface dégarnie : 0,78 % Surface éclatement : 0,64 % Surface totale : 1,42 %	Surface dégarnie : 1,05 % Surface éclatement : 0,33 % Surface totale : 1,37 %
21 cycles			 
	Surface dégarnie : 1,06 % Surface éclatement : 1,04 % Surface totale : 2,10 %	Surface dégarnie : 0,70 % Surface éclatement : 1,06 % Surface totale : 1,77 %	Surface dégarnie : 1,04 % Surface éclatement : 0,70 % Surface totale : 1,74 %

	12A-4	12A-5	12A-6
35 cycles			
	Surface dégarnie : 1,06 % Surface éclatement : 1,74 % Surface totale : 2,80 %	Surface dégarnie : 1,09 % Surface éclatement : 1,51 % Surface totale : 2,61 %	Surface dégarnie : 1,08 % Surface éclatement : 1,34 % Surface totale : 2,41 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 1,37 % Surface éclatement : 1,82 % Surface totale : 3,19 %	Surface dégarnie : 1,02 % Surface éclatement : 1,80 % Surface totale : 2,81 %	Surface dégarnie : 1,42 % Surface éclatement : 1,70 % Surface totale : 3,12 %

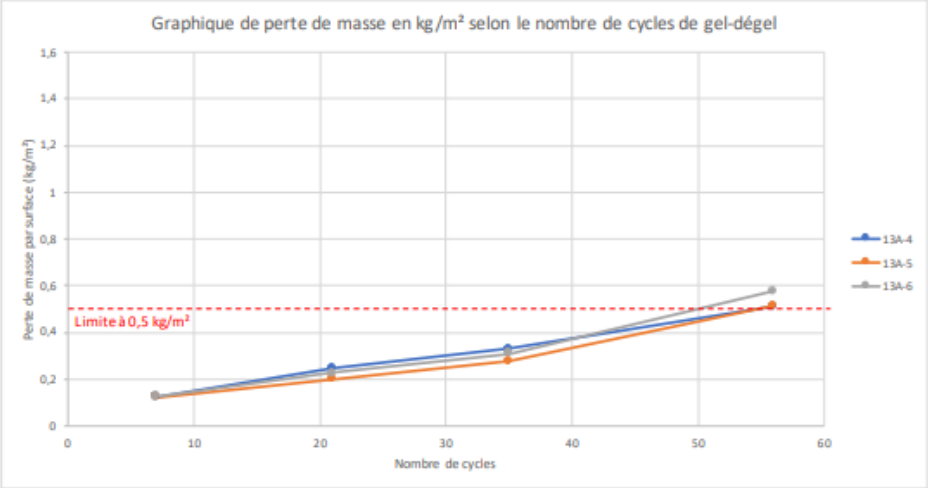
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 13A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	13A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	V-S	**Affaissement :**	110 mm
Batch No :	2	**Teneur en air :**	7,6%
Date de fabrication :	2019-09-04	**Masse volumique :**	2273 kg/m^3
W/C contact :	14h05	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

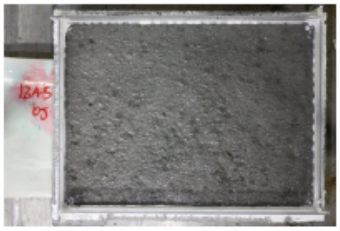
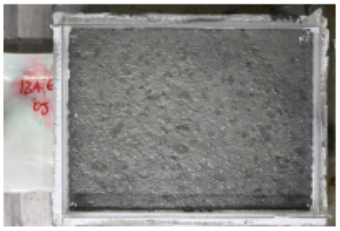
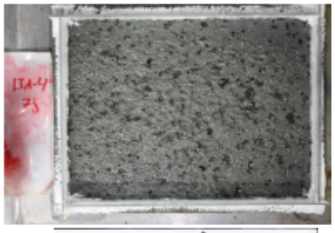
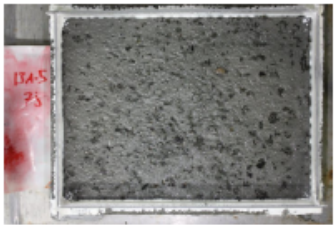
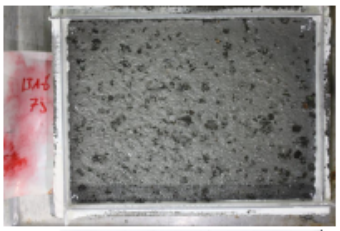
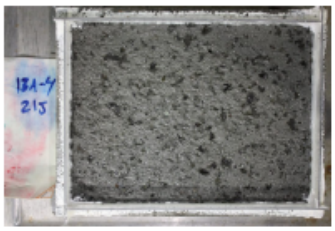
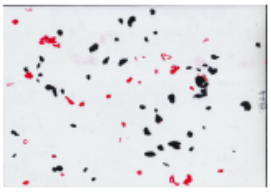
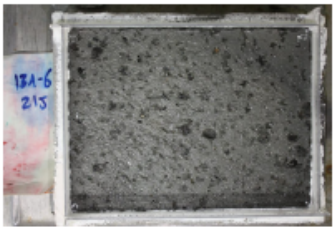
Résultats

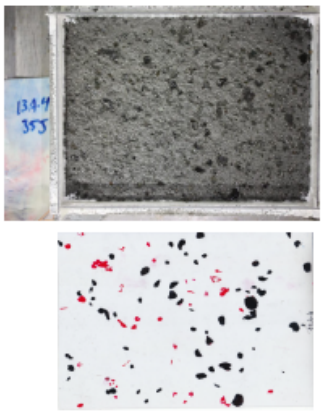
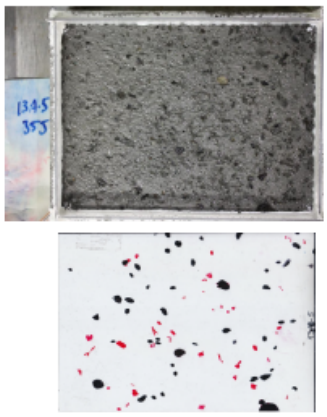
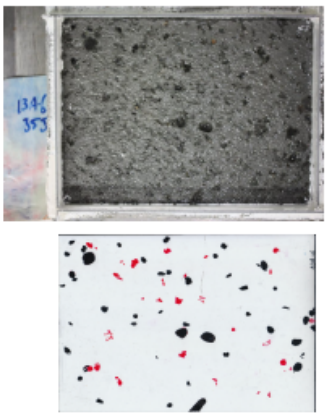
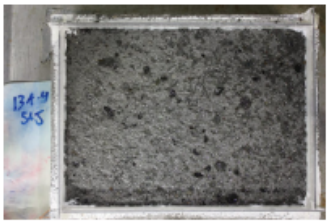
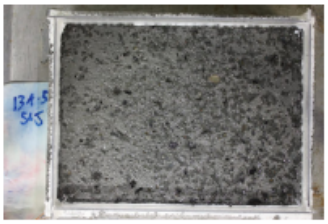
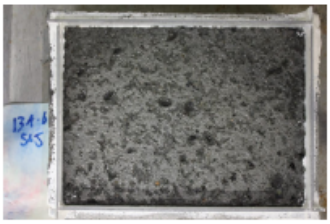
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
13A-4	0	0,0	541,0	2019-10-09				
13A-5	0	0,0	559,0					
13A-6	0	0,0	541,3					
13A-4	7	6,7	541,0	2019-10-16	2-B	6,7	0,1	**0,1**
13A-5	7	6,8	559,0		2-A	6,8	0,1	
13A-6	7	6,8	541,3		2-B	6,8	0,1	
13A-4	21	6,6	541,0	2019-10-30	3-C	13,3	0,2	**0,2**
13A-5	21	4,5	559,0		3-B	11,3	0,2	
13A-6	21	5,6	541,3		3-B	12,4	0,2	
13A-4	35	4,5	541,0	2019-11-13	3-C	17,8	0,3	**0,3**
13A-5	35	4,1	559,0		3-C	15,4	0,3	
13A-6	35	4,4	541,3		3-C	16,8	0,3	
13A-4	56	9,9	541,0	2019-12-04	4-C	27,7	0,5	**0,5**
13A-5	56	13,4	559,0		4-C	28,8	0,5	
13A-6	56	14,5	541,3		5-C	31,3	0,6	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	13A-4	13A-5	13A-6
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégamie : 1,62 % *Surface éclatement :* 1,12 % *Surface totale :* 2,74 %	*Surface dégamie :* 1,04 % *Surface éclatement :* 0,92 % *Surface totale :* 1,96 %	*Surface dégamie :* 1,23 % *Surface éclatement :* 1,36 % *Surface totale :* 2,59 %
21 cycles	 		
	Surface dégamie : 1,92 % *Surface éclatement :* 2,84 % *Surface totale :* 4,76 %	*Surface dégamie :* 1,79 % *Surface éclatement :* 1,71 % *Surface totale :* 3,50 %	*Surface dégamie :* 1,50 % *Surface éclatement :* 2,24 % *Surface totale :* 3,74 %

	13A-4	13A-5	13A-6
35 cycles			
	Surface dégamie : 1,26 % Surface éclatement : 4,03 % Surface totale : 5,29 %	Surface dégamie : 1,72 % Surface éclatement : 2,69 % Surface totale : 4,41 %	Surface dégamie : 1,65 % Surface éclatement : 3,11 % Surface totale : 4,75 %
56 cycles			
	Surface dégamie : 2,24 % Surface éclatement : 4,20 % Surface totale : 6,44 %	Surface dégamie : 2,48 % Surface éclatement : 3,06 % Surface totale : 5,54 %	Surface dégamie : 2,11 % Surface éclatement : 3,68 % Surface totale : 5,79 %

Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

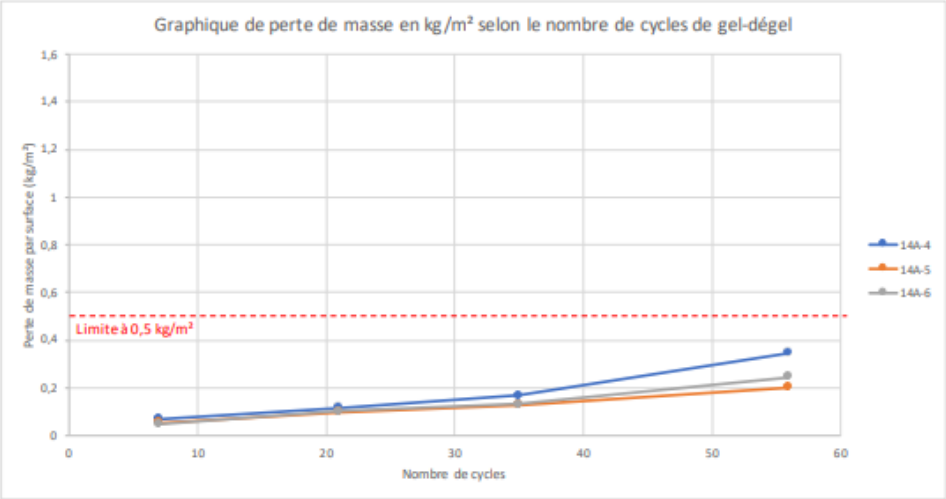
Mélange : Mix 14A-2
Source du granulat : 14A
Projet/Contrat : MTQ - écaillage
Type de béton : Béton coulé
Batch No : 2
Date de fabrication : 2019-09-04
W/C contact : 14h38
Historique de cure : 100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)

Norme : BNQ 2621-905 / 2018
Consolidation : Bourroir
Dimension dalle : 300 mm x 230 mm
Affaissement : 160 mm
Teneur en air : 8,1%
Masse volumique : 2304 kg/m^3
Essai réalisé : T. Duplessis
A. De Almeida Rodrigues

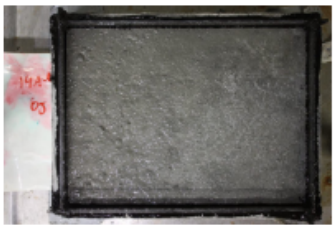
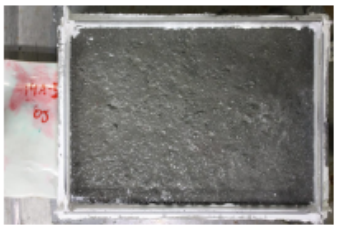
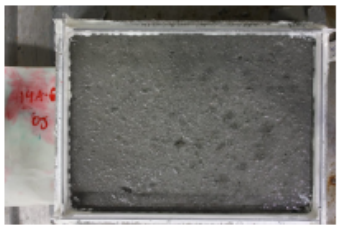
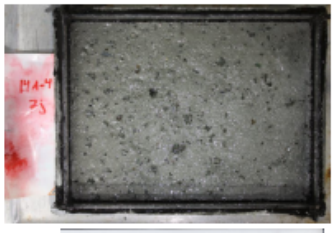
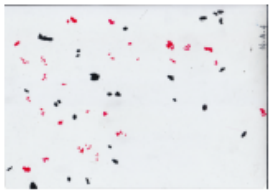
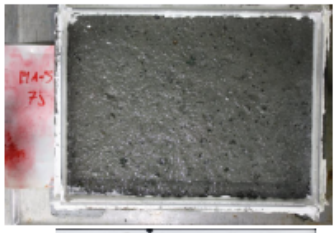
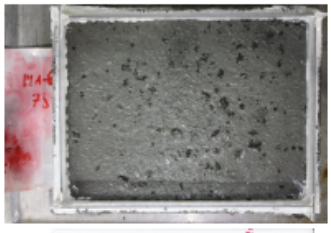
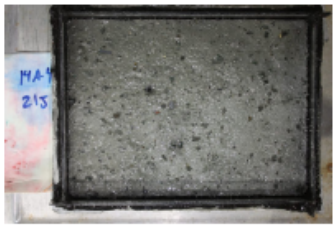
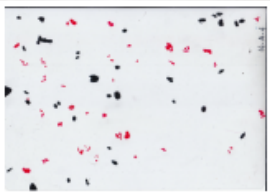
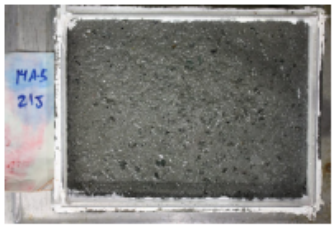
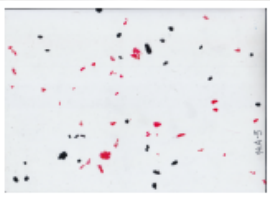
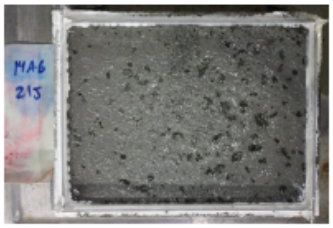
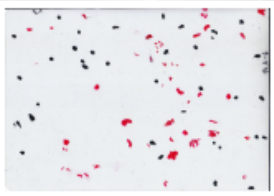
Résultats

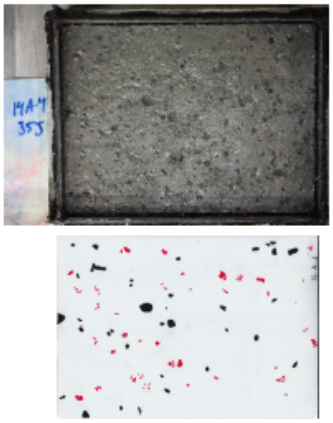
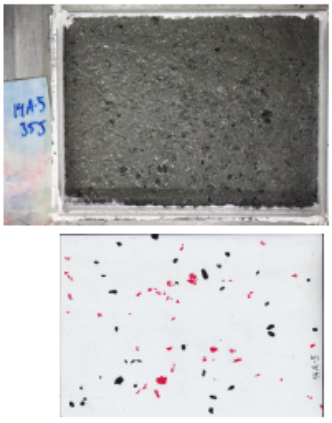
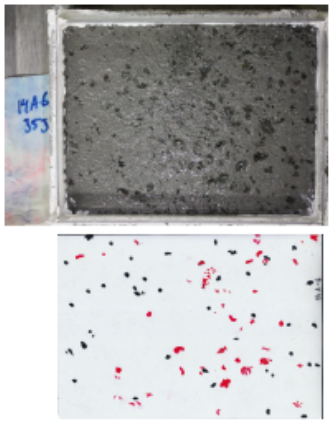
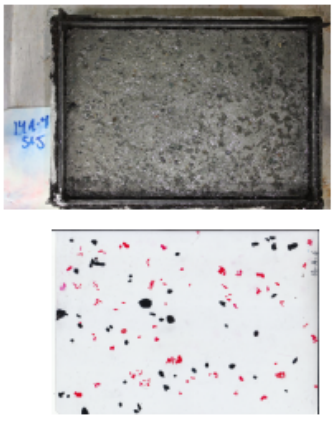
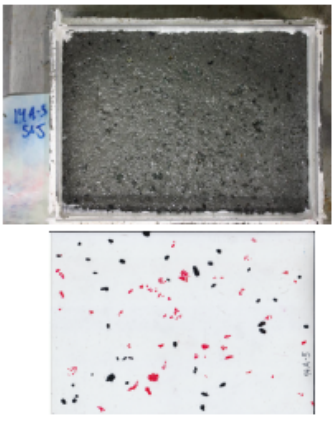
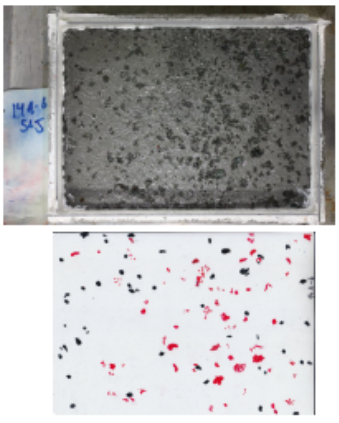
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
14A-4	0	0,0	537,5	2019-10-09				
14A-5	0	0,0	551,6					
14A-6	0	0,0	541,0					
14A-4	7	3,7	537,5	2019-10-16	1-A	3,7	0,1	**0,1**
14A-5	7	2,9	551,6		1-A	2,9	0,1	
14A-6	7	2,6	541,0		1-A	2,6	0,0	
14A-4	21	2,6	537,5	2019-10-30	2-B	6,3	0,1	**0,1**
14A-5	21	2,5	551,6		2-A	5,4	0,1	
14A-6	21	2,9	541,0		2-B	5,5	0,1	
14A-4	35	2,8	537,5	2019-11-13	2-B	9,1	0,2	**0,1**
14A-5	35	1,8	551,6		2-A	7,2	0,1	
14A-6	35	1,6	541,0		2-B	7,1	0,1	
14A-4	56	9,5	537,5	2019-12-04	3-B	18,6	0,3	**0,3**
14A-5	56	3,9	551,6		3-B	11,1	0,2	
14A-6	56	6,1	541,0		3-B	13,2	0,2	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	14A-4	14A-5	14A-6
0 cycles			
7 cycles	 		
	Surface dégarnie : 1,23 % Surface éclatement : 0,96 % Surface totale : 2,19 %	Surface dégarnie : 1,40 % Surface éclatement : 0,42 % Surface totale : 1,82 %	Surface dégarnie : 1,23 % Surface éclatement : 0,52 % Surface totale : 1,75 %
21 cycles	 	 	 
	Surface dégarnie : 1,79 % Surface éclatement : 1,41 % Surface totale : 3,20 %	Surface dégarnie : 1,53 % Surface éclatement : 0,72 % Surface totale : 2,25 %	Surface dégarnie : 1,95 % Surface éclatement : 1,03 % Surface totale : 2,98 %

	14A-4	14A-5	14A-6
35 cycles			
	Surface dégamie : 1,45 % *Surface éclatement :* 1,59 % *Surface totale :* 3,04 %	*Surface dégamie :* 1,62 % *Surface éclatement :* 0,95 % *Surface totale :* 2,57 %	*Surface dégamie :* 2,22 % *Surface éclatement :* 1,15 % *Surface totale :* 3,37 %
56 cycles			
	Surface dégamie : 2,18 % *Surface éclatement :* 1,88 % *Surface totale :* 4,06 %	*Surface dégamie :* 2,01 % *Surface éclatement :* 1,06 % *Surface totale :* 3,07 %	*Surface dégamie :* 2,56 % *Surface éclatement :* 1,40 % *Surface totale :* 3,96 %

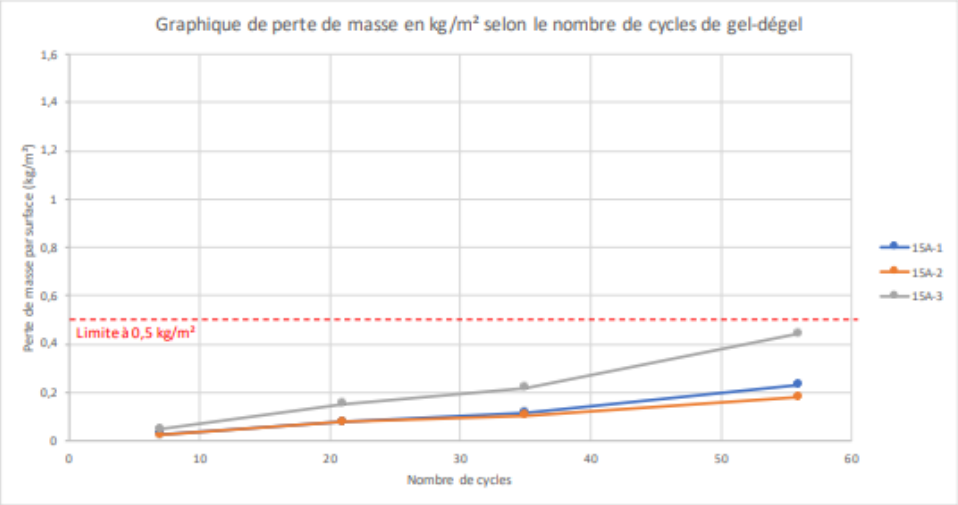
Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

Mélange :	Mix 15A	**Norme :**	BNQ 2621-905 / 2018
Source du granulat :	15A	**Consolidation :**	Bourroir
Projet/Contrat :	MTQ - écaillage	**Dimension dalle :**	300 mm x 230 mm
Type de béton :	V-S	**Affaissement :**	150 mm
Batch No :	1	**Teneur en air :**	6,2%
Date de fabrication :	2019-08-21	**Masse volumique :**	2308 kg/m^3
W/C contact :	15h02	**Essai réalisé :**	T. Duplessis
Historique de cure :	100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)		A. De Almeida Rodrigues

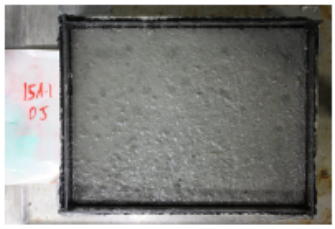
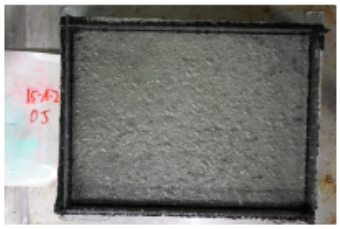
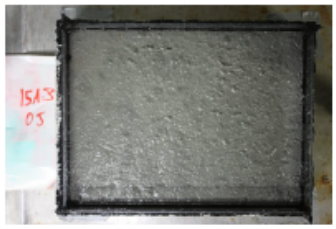
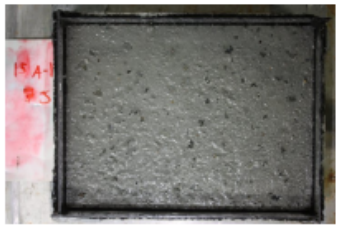
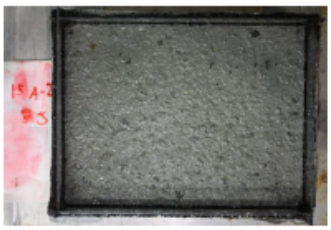
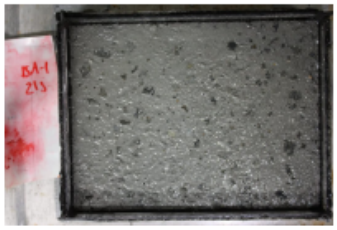
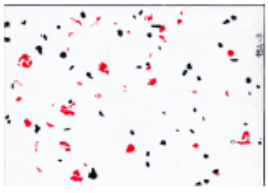
Résultats

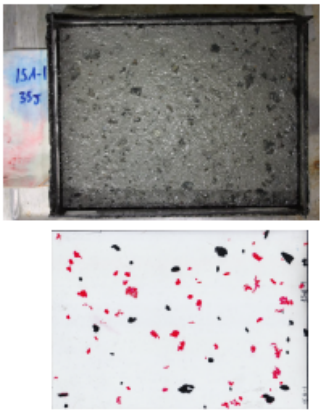
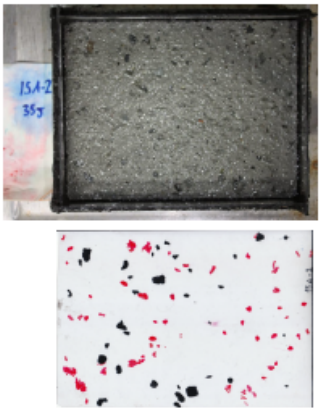
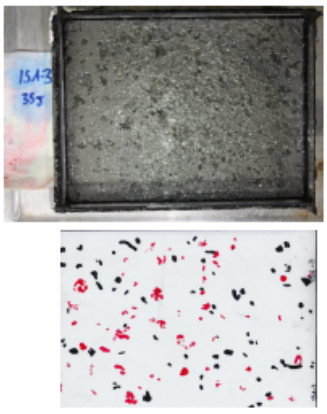
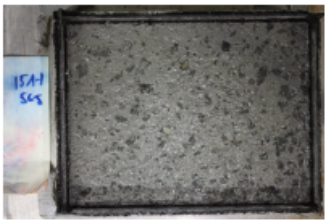
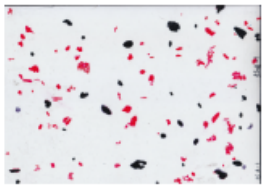
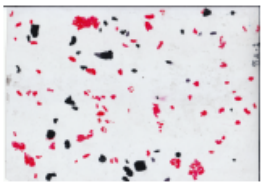
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
15A-1	0	0,0	574,8	2019-09-25				
15A-2	0	0,0	557,6					
15A-3	0	0,0	571,7					
15A-1	7	1,5	574,8	2019-10-02	1-A	1,5	0,0	
15A-2	7	1,4	557,6		1-A	1,4	0,0	**0,0**
15A-3	7	2,8	571,7		1-A	2,8	0,0	
15A-1	21	2,9	574,8	2019-10-16	1-A	4,4	0,1	
15A-2	21	2,9	557,6		1-B	4,3	0,1	**0,1**
15A-3	21	6,0	571,7		2-B	8,8	0,2	
15A-1	35	2,4	574,8	2019-10-30	2-B	6,8	0,1	
15A-2	35	1,5	557,6		2-B	5,8	0,1	**0,1**
15A-3	35	3,8	571,7		3-C	12,6	0,2	
15A-1	56	6,5	574,8	2019-11-20	3-B	13,3	0,2	
15A-2	56	4,3	557,6		3-B	10,1	0,2	**0,3**
15A-3	56	12,8	571,7		4-C	25,4	0,4	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	15A-1	15A-2	15A-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégamie : 2,24 % *Surface éclatement :* 0,35 % *Surface totale :* 2,59 %	*Surface dégamie :* 1,42 % *Surface éclatement :* 0,88 % *Surface totale :* 2,29 %	*Surface dégamie :* 1,64 % *Surface éclatement :* 0,90 % *Surface totale :* 2,54 %
21 cycles			
	Surface dégamie : 2,88 % *Surface éclatement :* 0,49 % *Surface totale :* 3,38 %	*Surface dégamie :* 2,44 % *Surface éclatement :* 1,52 % *Surface totale :* 3,96 %	*Surface dégamie :* 2,83 % *Surface éclatement :* 1,75 % *Surface totale :* 4,59 %

	15A-1	15A-2	15A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 3,16 % *Surface éclatement :* 1,60 % *Surface totale :* 4,76 %	*Surface dégarnie :* 3,11 % *Surface éclatement :* 2,26 % *Surface totale :* 5,37 %	*Surface dégarnie :* 3,27 % *Surface éclatement :* 3,03 % *Surface totale :* 6,30 %
56 cycles	 		
	Surface dégarnie : 4,07 % *Surface éclatement :* 1,85 % *Surface totale :* 5,92 %	*Surface dégarnie :* 4,94 % *Surface éclatement :* 2,44 % *Surface totale :* 7,37 %	*Surface dégarnie :* 4,72 % *Surface éclatement :* 3,07 % *Surface totale :* 7,78 %

Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

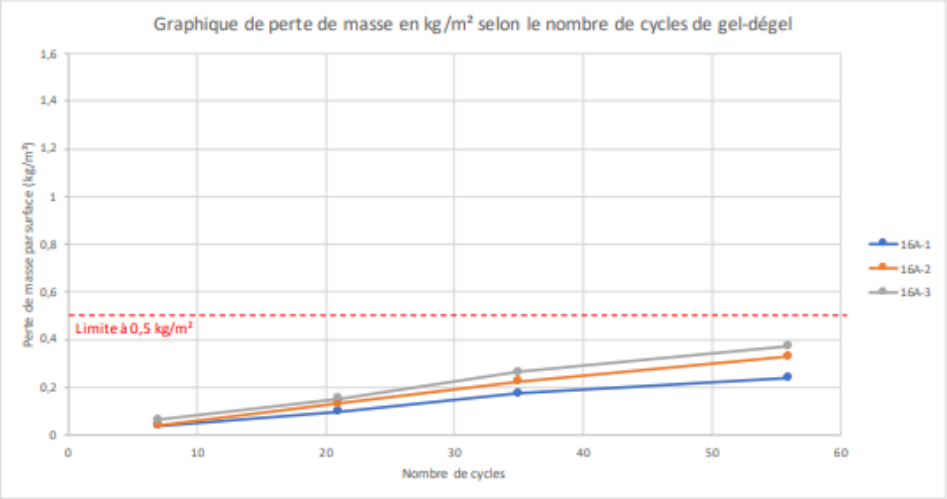
Mélange : Mix 16A
Source du granulat : 16A
Projet/Contrat : MTQ - écaillage
Type de béton : Béton coulé
Batch No : 1
Date de fabrication : 2019-09-18
W/C contact : 14h50
Historique de cure : 100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)

Norme : BNQ 2621-905 / 2018
Consolidation : Bourroir
Dimension dalle : 300 mm x 230 mm
Affaissement : 100 mm
Teneur en air : 7,8%
Masse volumique : 2265 kg/m^3
Essai réalisé : T. Duplessis
A. De Almeida Rodrigues

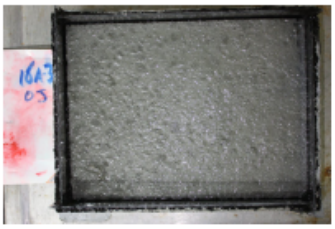
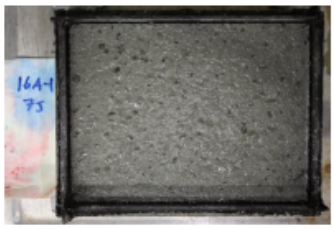
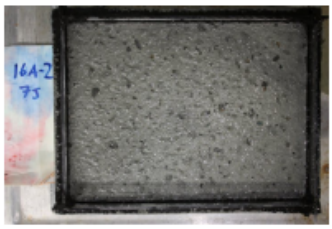
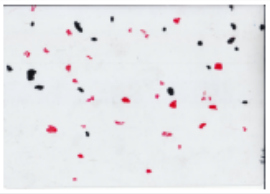
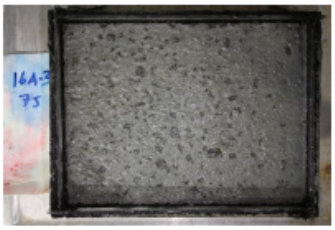
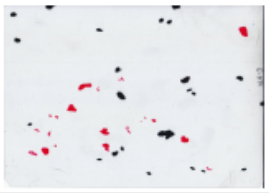
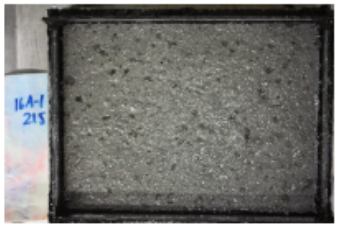
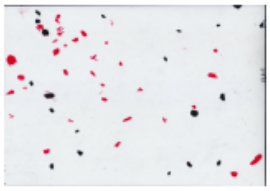
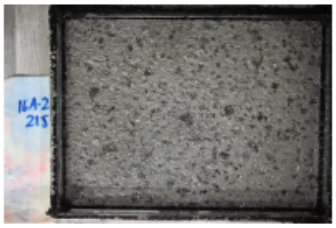
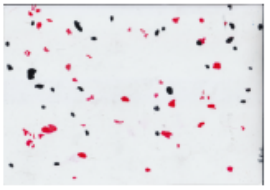
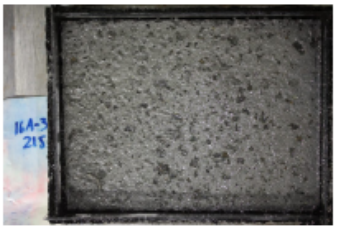
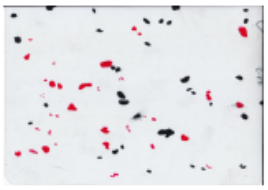
Résultats

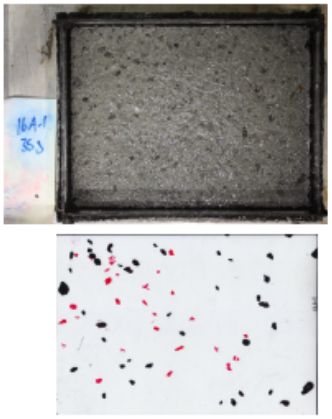
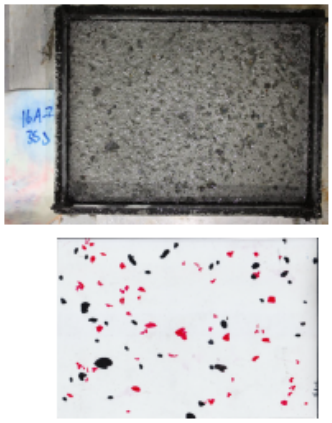
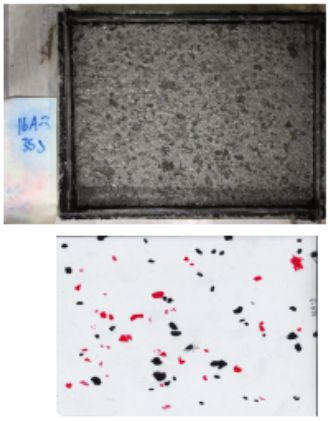
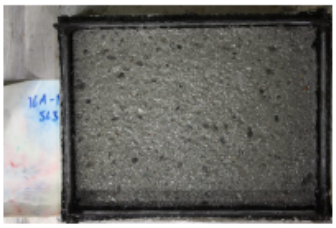
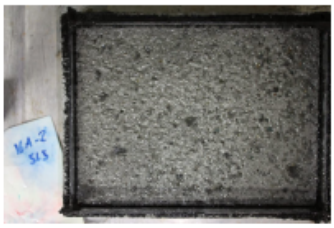
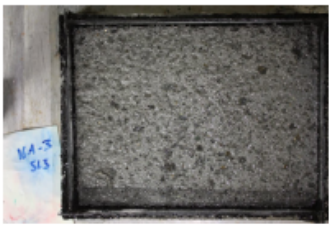
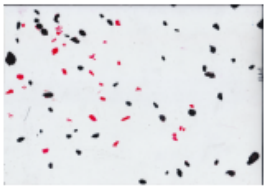
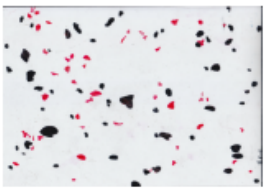
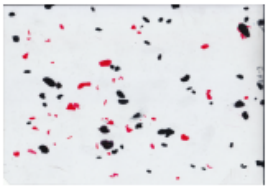
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
16A-1	0	0,0	551,0	2019-10-23				
16A-2	0	0,0	542,7					
16A-3	0	0,0	552,2					
16A-1	7	2,1	551,0	2019-10-30	1-A	2,1	0,0	**0,0**
16A-2	7	2,2	542,7		1-A	2,2	0,0	
16A-3	7	3,6	552,2		1-B	3,6	0,1	
16A-1	21	3,4	551,0	2019-11-13	2-A	5,5	0,1	**0,1**
16A-2	21	5,0	542,7		2-B	7,2	0,1	
16A-3	21	4,9	552,2		2-B	8,5	0,2	
16A-1	35	4,1	551,0	2019-11-27	2-B	9,6	0,2	**0,2**
16A-2	35	5,0	542,7		3-B	12,2	0,2	
16A-3	35	6,1	552,2		3-B	14,6	0,3	
16A-1	56	3,6	551,0	2019-12-18	3-C	13,2	0,2	**0,3**
16A-2	56	5,7	542,7		3-C	17,9	0,3	
16A-3	56	6,0	552,2		4-C	20,6	0,4	

Notes :



Version 2.1 - Sept 2020

	16A-1	16A-2	16A-3
0 cycles			
7 cycles		 	 
	Surface dégarnie : 1,44 % *Surface éclatement :* 0,38 % *Surface totale :* 1,82 %	*Surface dégarnie :* 1,77 % *Surface éclatement :* 0,93 % *Surface totale :* 2,70 %	*Surface dégarnie :* 1,19 % *Surface éclatement :* 1,02 % *Surface totale :* 2,20 %
21 cycles	 	 	 
	Surface dégarnie : 2,10 % *Surface éclatement :* 0,71 % *Surface totale :* 2,81 %	*Surface dégarnie :* 2,51 % *Surface éclatement :* 1,26 % *Surface totale :* 3,76 %	*Surface dégarnie :* 2,31 % *Surface éclatement :* 1,39 % *Surface totale :* 3,70 %

	16A-1	16A-2	16A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 1,80 % Surface éclatement : 2,22 % Surface totale : 4,02 %	Surface dégarnie : 2,60 % Surface éclatement : 2,26 % Surface totale : 4,86 %	Surface dégarnie : 2,25 % Surface éclatement : 2,26 % Surface totale : 4,50 %
56 cycles			
			
	Surface dégarnie : 1,95 % Surface éclatement : 2,52 % Surface totale : 4,47 %	Surface dégarnie : 2,09 % Surface éclatement : 3,74 % Surface totale : 5,82 %	Surface dégarnie : 2,28 % Surface éclatement : 2,78 % Surface totale : 5,06 %

Essai d'écaillage - BNQ 2621-905 / 2018

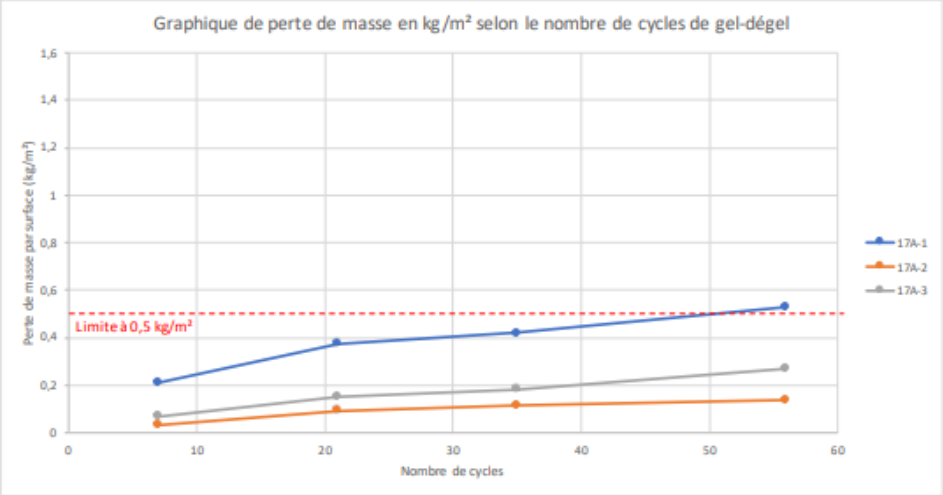
Mélange : Mix 17A
Source du granulat : 17A
Projet/Contrat : MTQ - écaillage
Type de béton : Béton coulé
Batch No : 1
Date de fabrication : 2019-08-21
W/C contact : 15h47
Historique de cure : 100% HR (14 jrs) - 50%HR (14 jrs) - Sol. Saline (7 jrs)

Norme : BNQ 2621-905 / 2018
Consolidation : Bourroir
Dimension dalle : 300 mm x 230 mm
Affaissement : 90 mm
Teneur en air : 7,0%
Masse volumique : 2235 kg/m^3
Essai réalisé : T. Duplessis
A. De Almeida Rodrigues

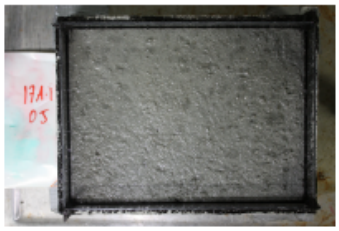
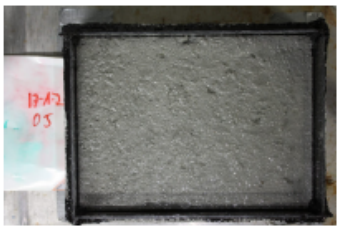
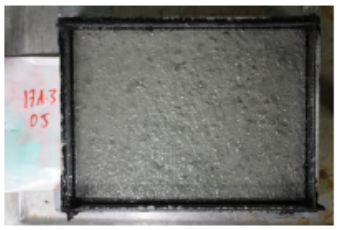
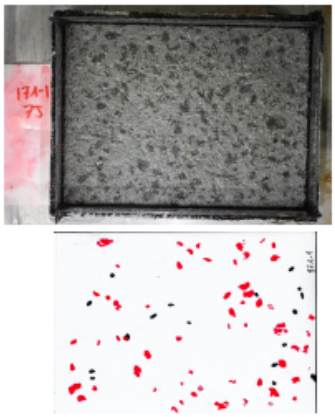
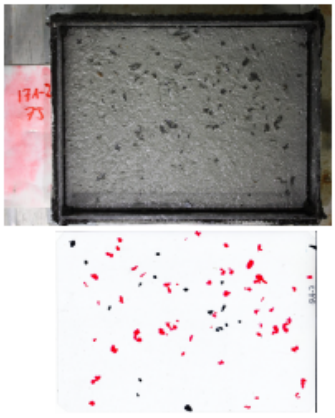
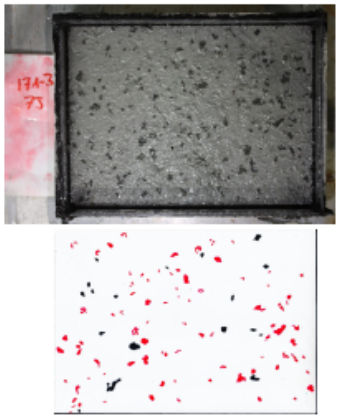
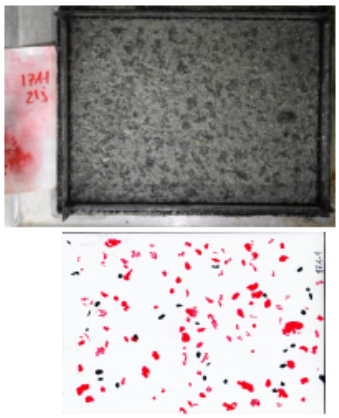
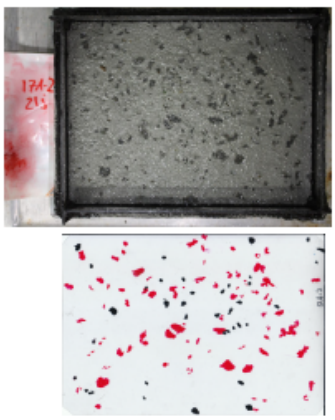
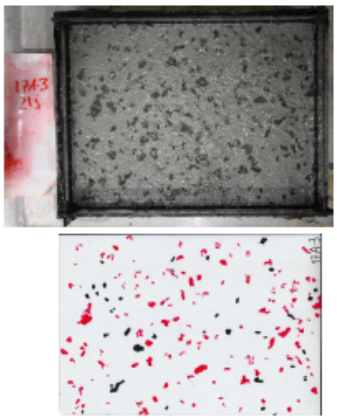
Résultats

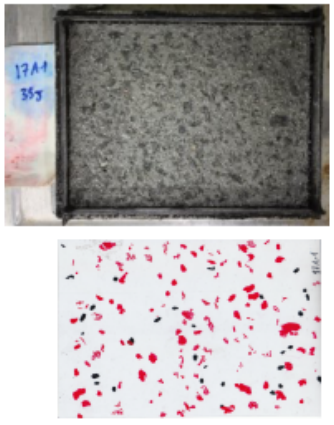
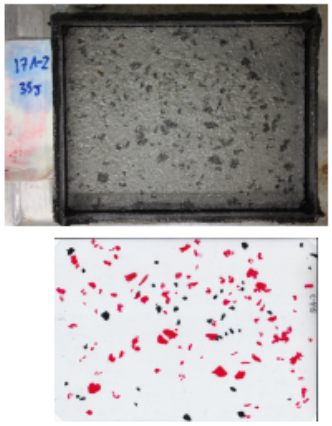
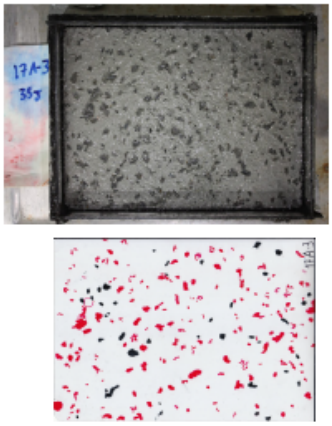
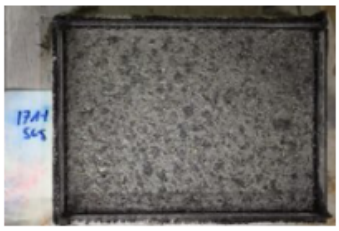
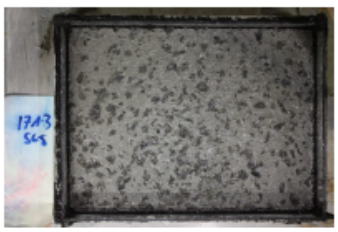
Plaque	Age [d]	Perte de masse [g]	Dimension surface exposée [cm²]	Date de prise de mesure	Cote d'évaluation visuelle	Perte de masse cumulée [g]	Perte de masse [kg/m²]	Perte de masse moyenne [kg/m²]
17A-1	0	0,0	559,1	2019-09-25				
17A-2	0	0,0	557,0					
17A-3	0	0,0	559,2					
17A-1	7	11,8	559,1	2019-10-02	3-A	11,8	0,2	0,1
17A-2	7	1,8	557,0		1-A	1,8	0,0	
17A-3	7	3,8	559,2		1-A	3,8	0,1	
17A-1	21	9,2	559,1	2019-10-16	4-A	21,0	0,4	0,2
17A-2	21	3,4	557,0		2-B	5,2	0,1	
17A-3	21	4,6	559,2		2-B	8,4	0,2	
17A-1	35	2,5	559,1	2019-10-30	4-B	23,5	0,4	0,2
17A-2	35	1,2	557,0		2-B	6,4	0,1	
17A-3	35	1,9	559,2		3-B	10,3	0,2	
17A-1	56	6,1	559,1	2019-11-20	4-A	29,6	0,5	0,3
17A-2	56	1,3	557,0		2-B	7,7	0,1	
17A-3	56	4,8	559,2		3-B	15,1	0,3	

Notes :



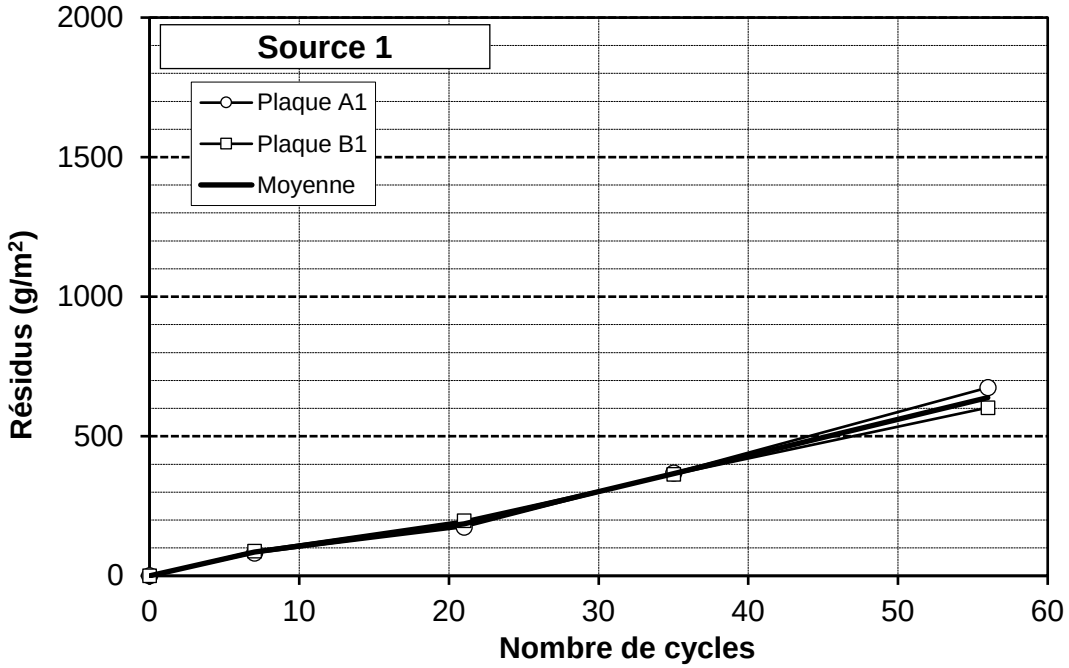
Version 2.1 - Sept 2020

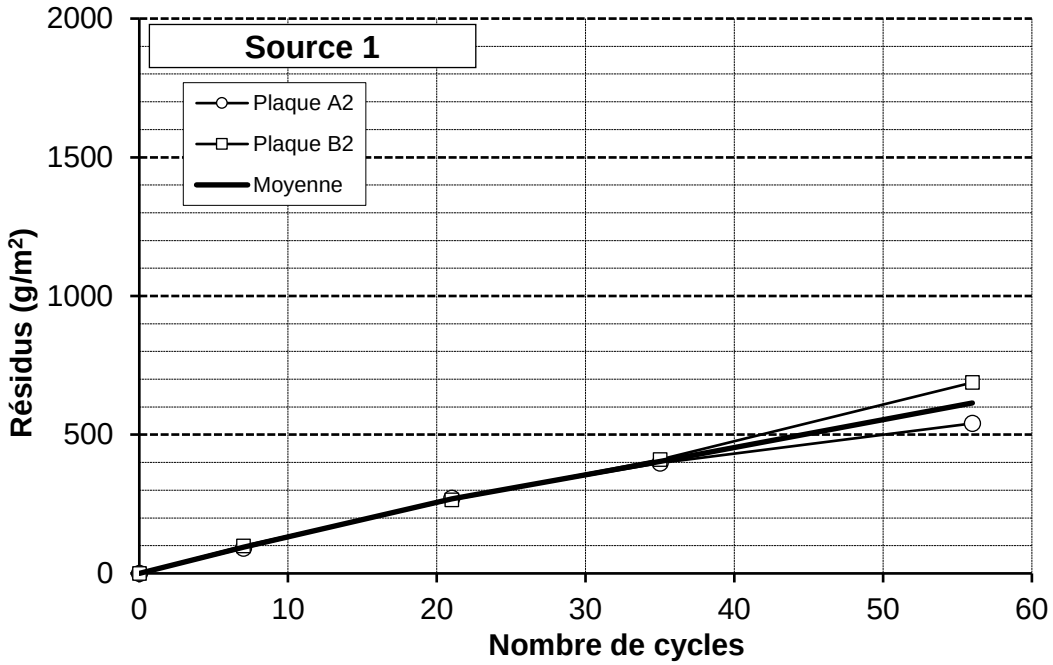
	17A-1	17A-2	17A-3
0 cycles			
7 cycles			
	Surface dégarnie : 4,26 % Surface éclatement : 0,56 % Surface totale : 4,81 %	Surface dégarnie : 2,56 % Surface éclatement : 0,36 % Surface totale : 2,93 %	Surface dégarnie : 2,80 % Surface éclatement : 0,69 % Surface totale : 3,49 %
21 cycles			
	Surface dégarnie : 6,49 % Surface éclatement : 0,84 % Surface totale : 7,32 %	Surface dégarnie : 4,98 % Surface éclatement : 1,09 % Surface totale : 6,07 %	Surface dégarnie : 4,85 % Surface éclatement : 1,11 % Surface totale : 5,96 %

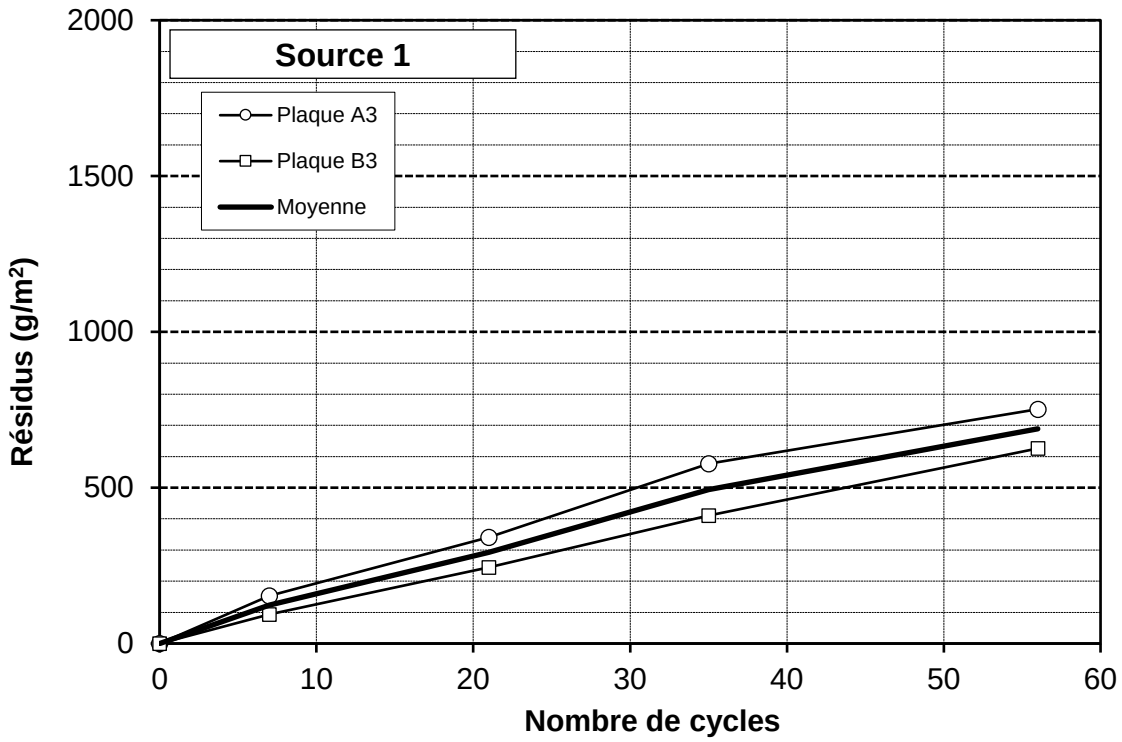
	17A-1	17A-2	17A-3
35 cycles			
	Surface dégarnie : 6,70 % Surface éclatement : 1,02 % Surface totale : 7,72 %	Surface dégarnie : 5,58 % Surface éclatement : 1,12 % Surface totale : 6,70 %	Surface dégarnie : 6,22 % Surface éclatement : 1,28 % Surface totale : 7,51 %
56 cycles			
	Surface dégarnie : 8,37 % Surface éclatement : 0,94 % Surface totale : 9,31 %	Surface dégarnie : 6,07 % Surface éclatement : 1,08 % Surface totale : 7,15 %	Surface dégarnie : 6,92 % Surface éclatement : 1,38 % Surface totale : 8,30 %

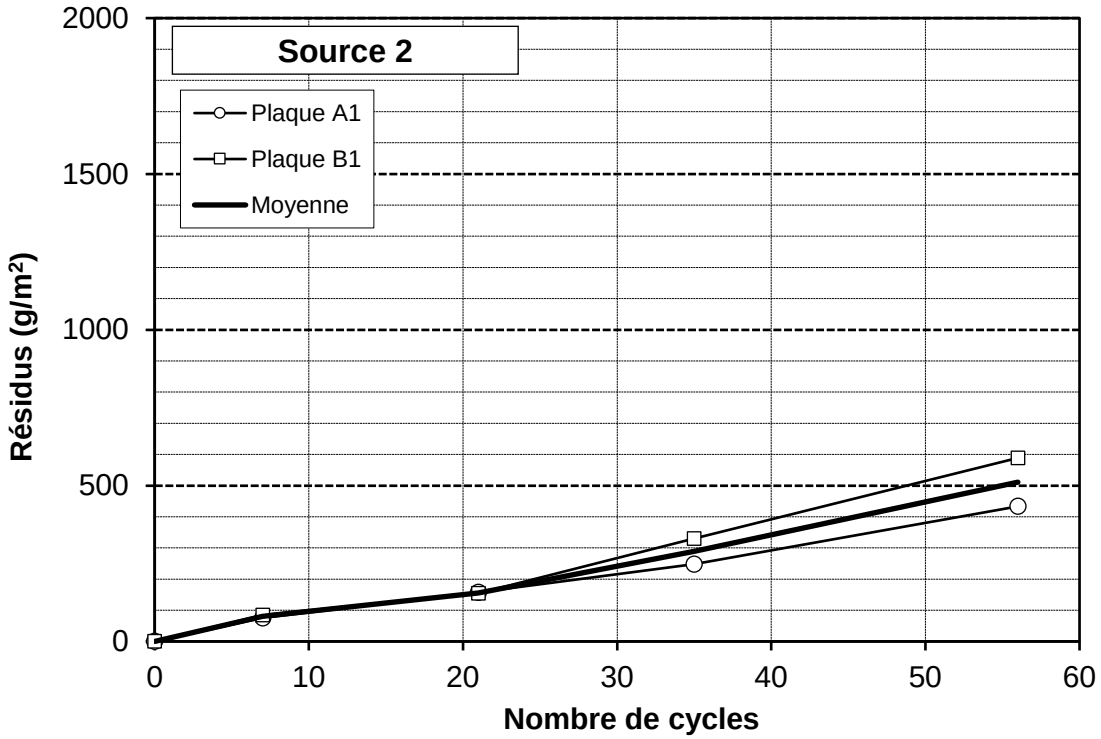
ANNEXE 3 – Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 1

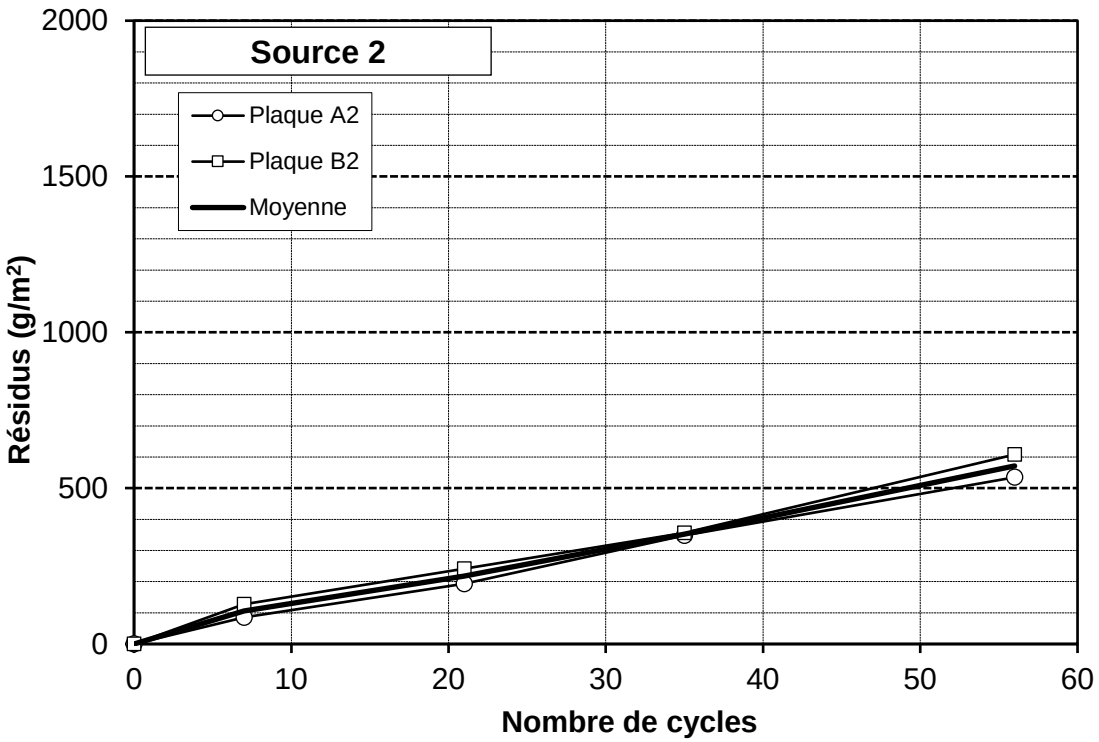
A1 et B1 – Localisation à gauche de le l'enceinte
A2 et B2 – Localisation au centre de l'enceinte
A3 et B3 – Localisation à droite de l'enceinte

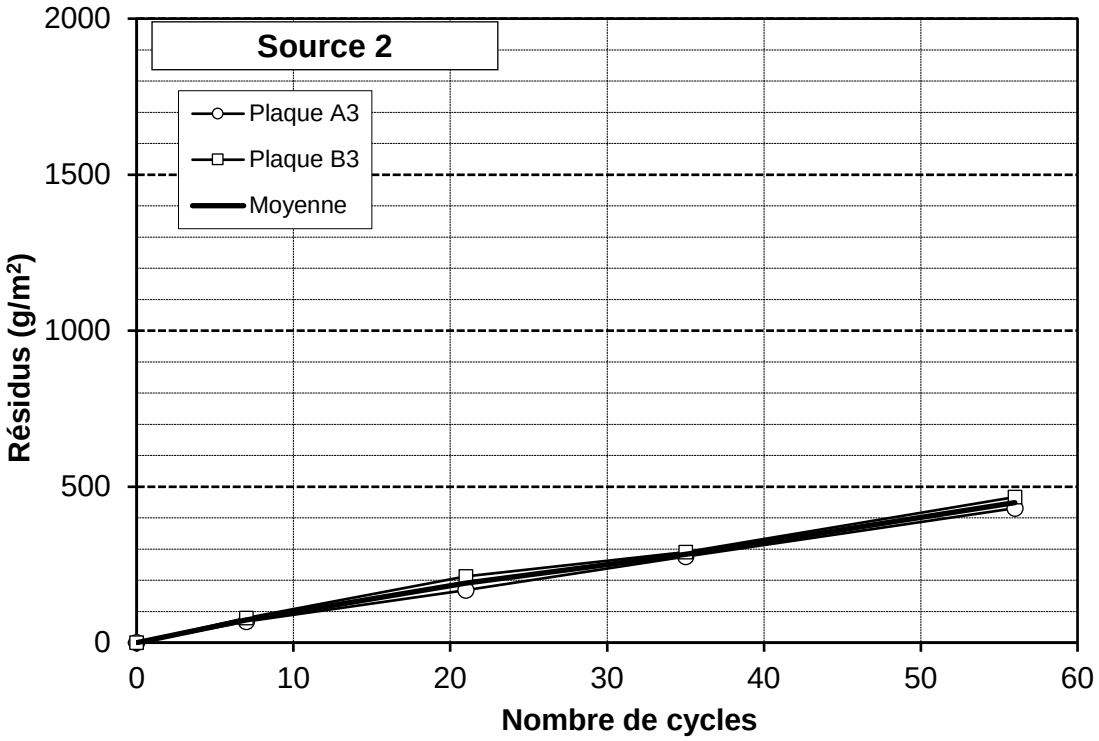


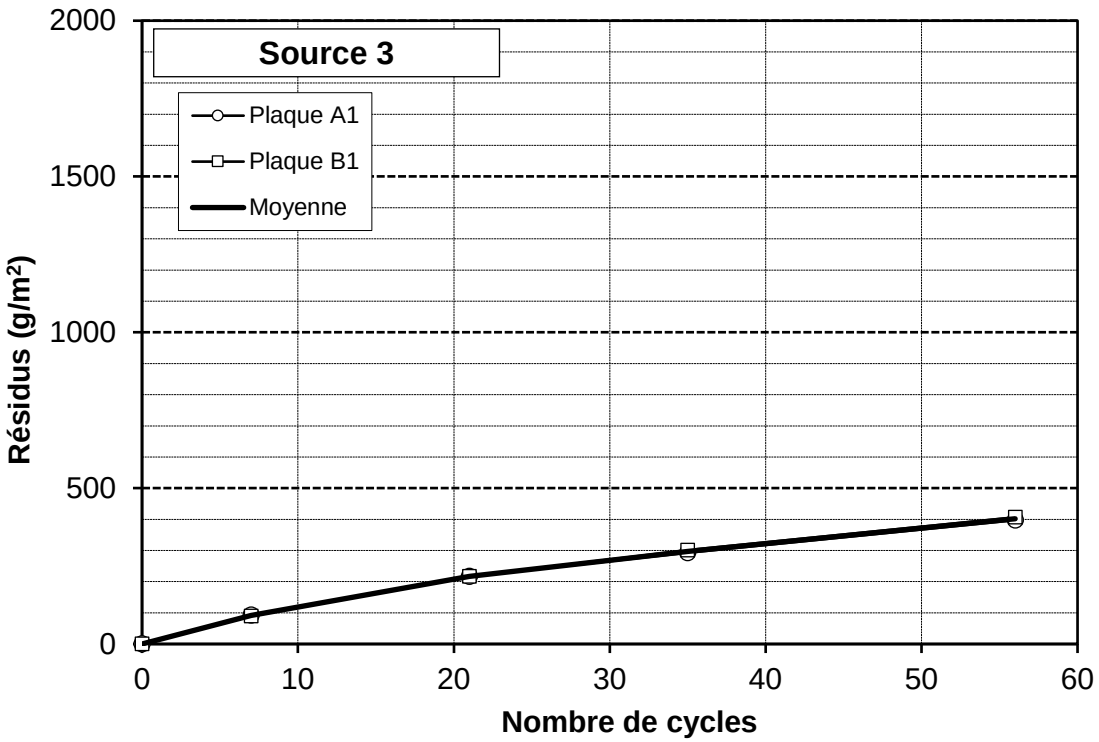


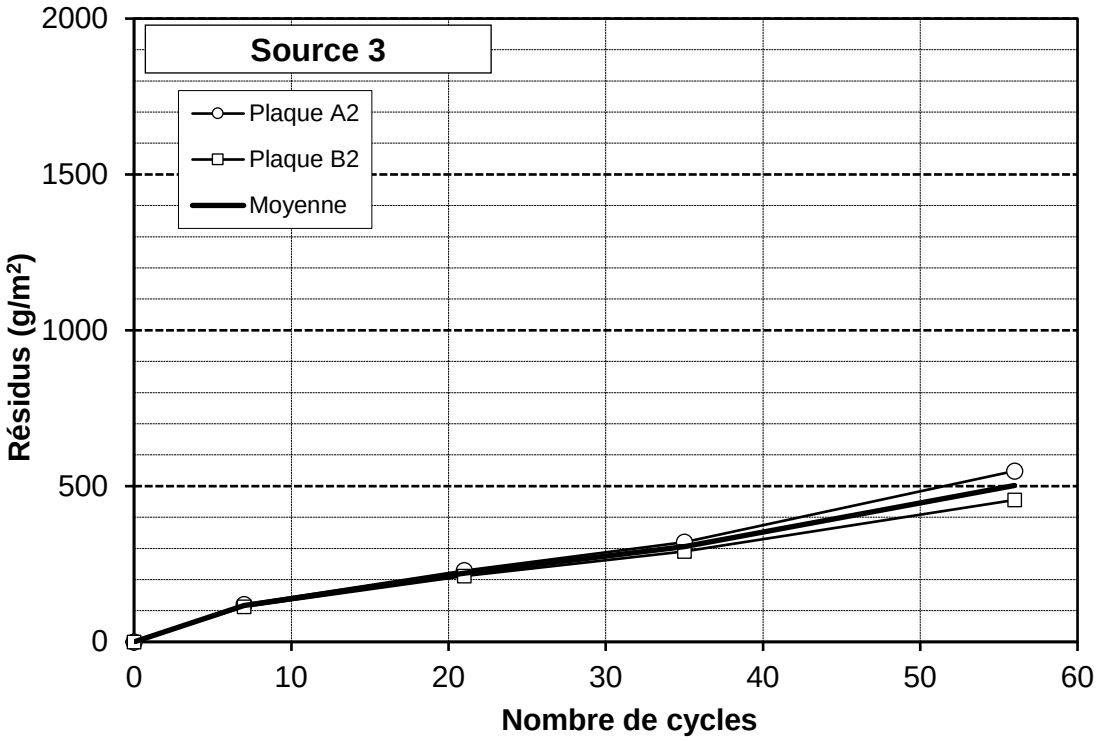

Source 1
Plaque A3
Plaque B3
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

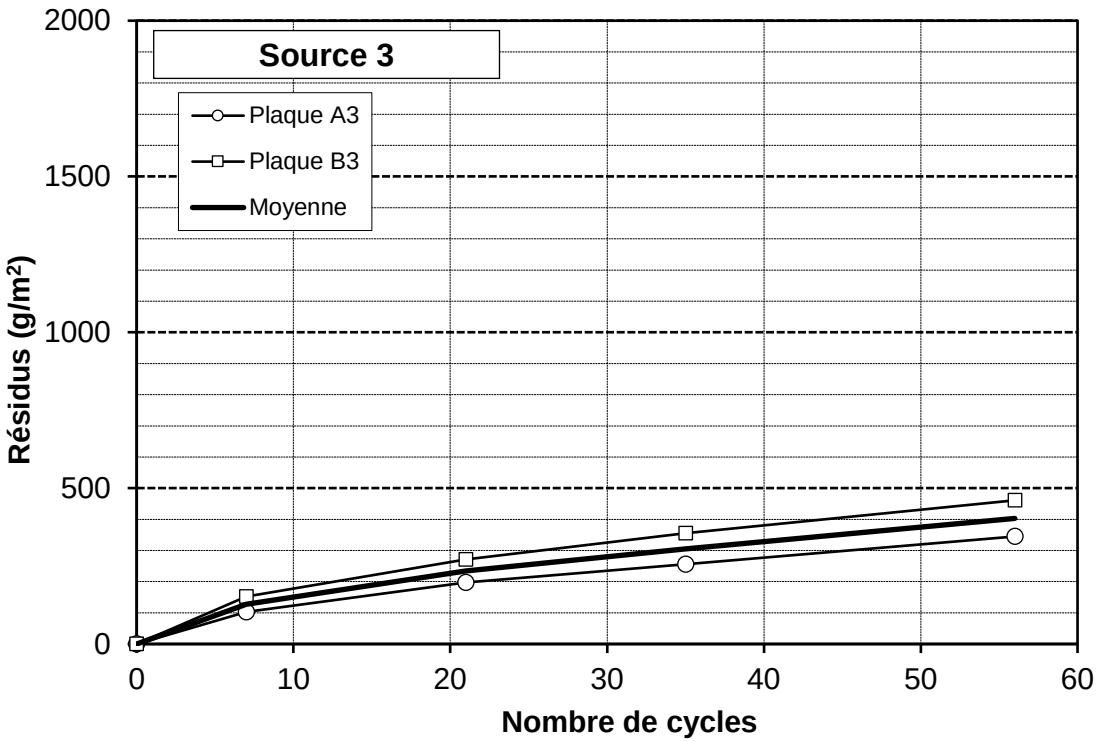

Source 2
Plaque A1
Plaque B1
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

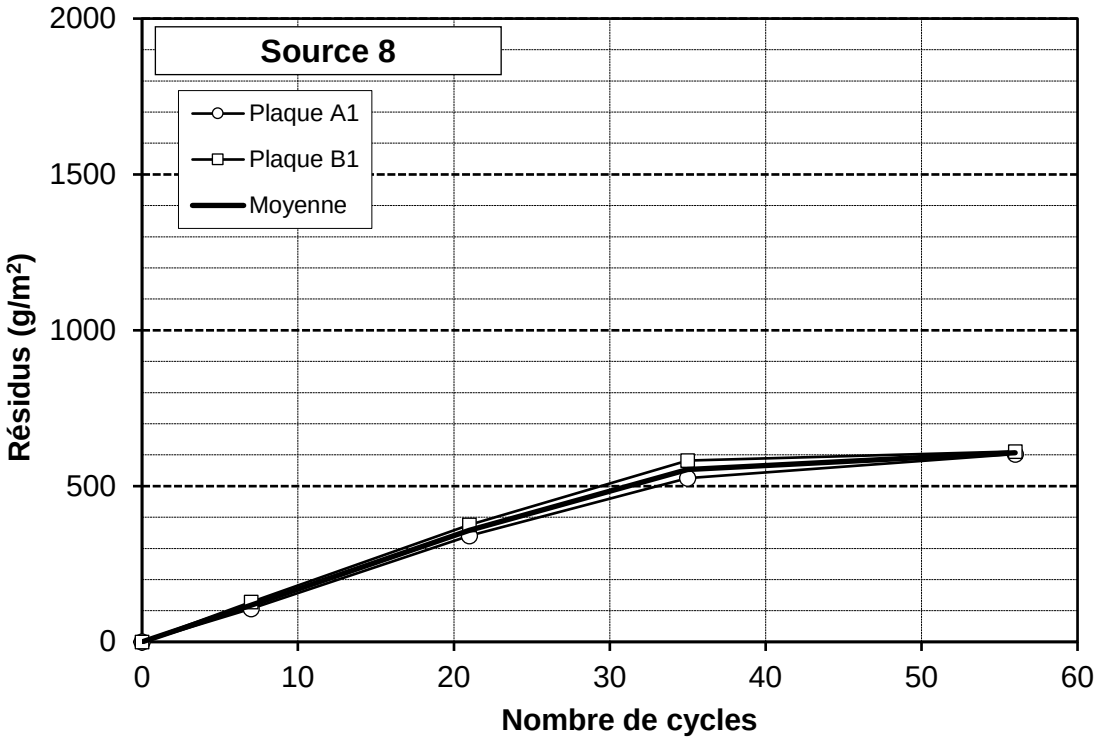

Source 2
Plaque A2
Plaque B2
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

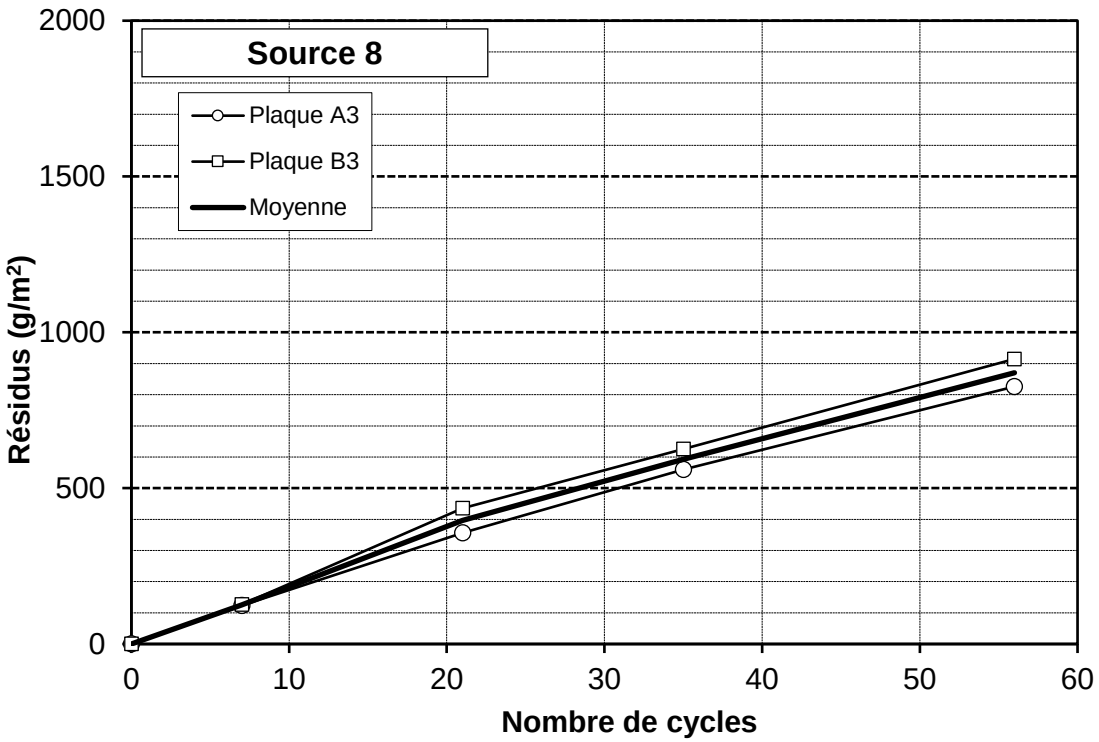

Source 2
Plaque A3
Plaque B3
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

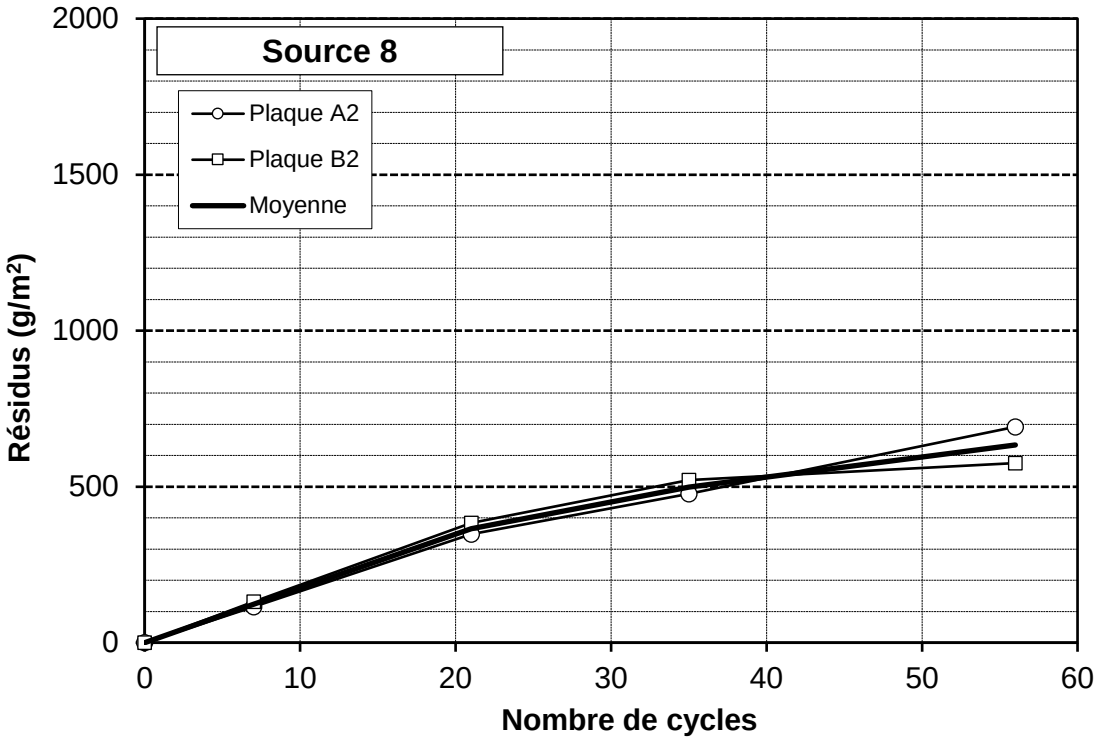

Source 3
Plaque A1
Plaque B1
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

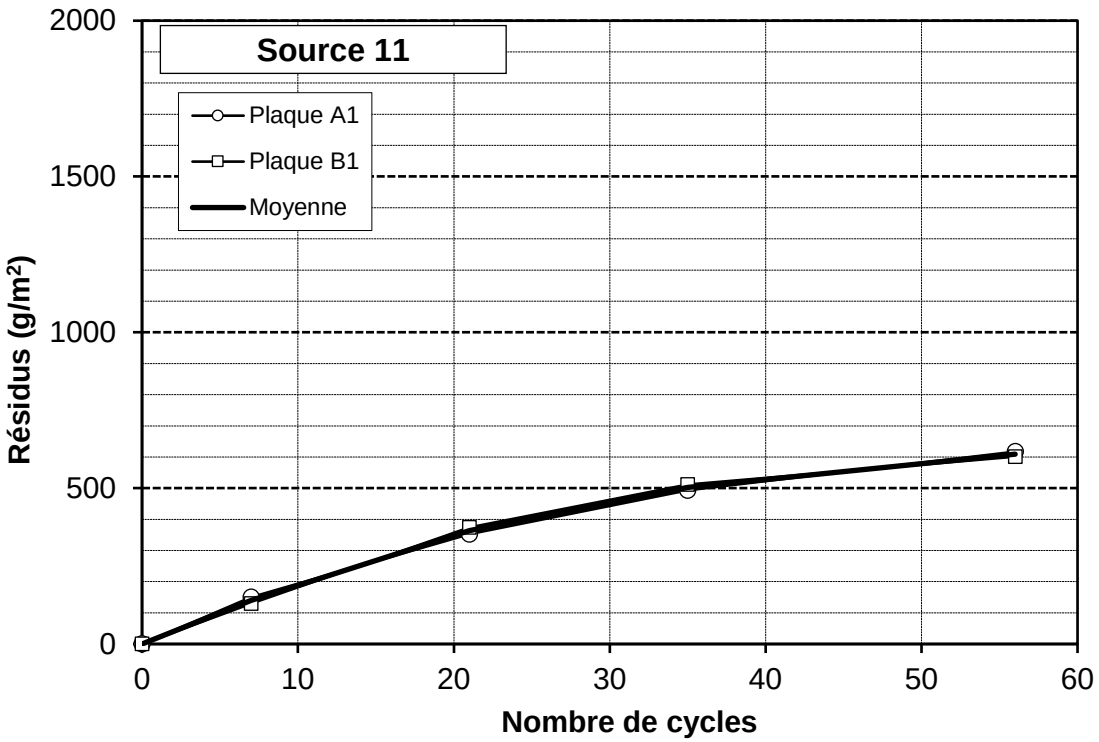

Source 3
Plaque A2
Plaque B2
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

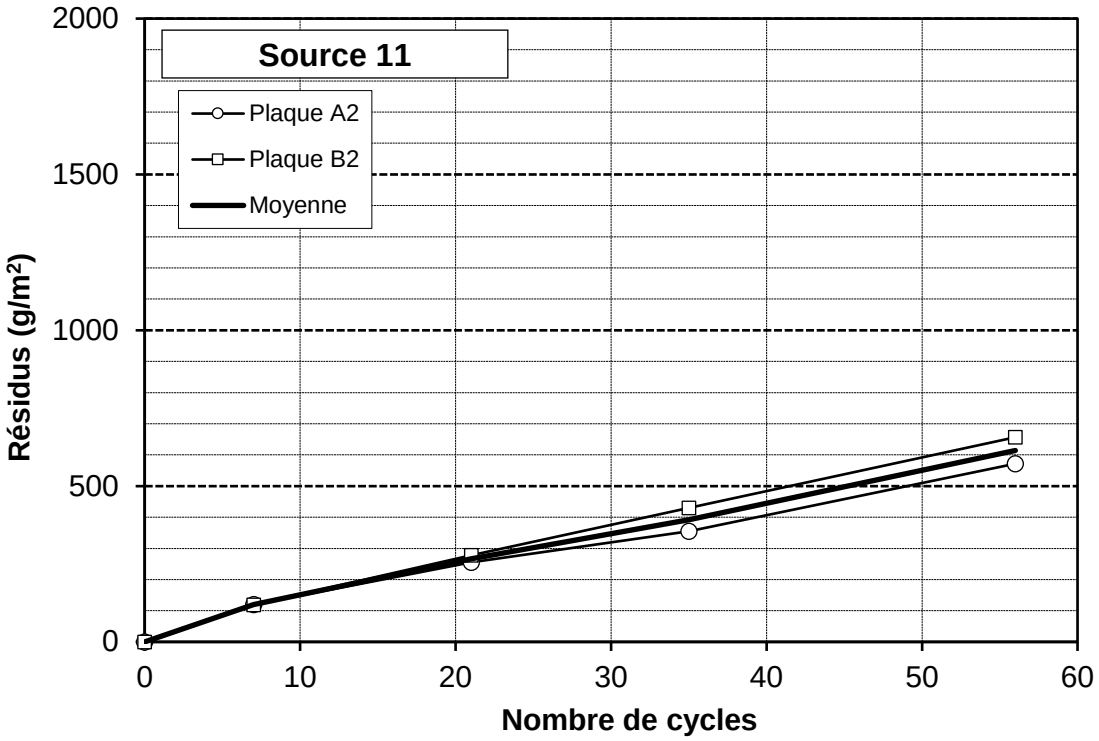

Source 3
Plaque A3
Plaque B3
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

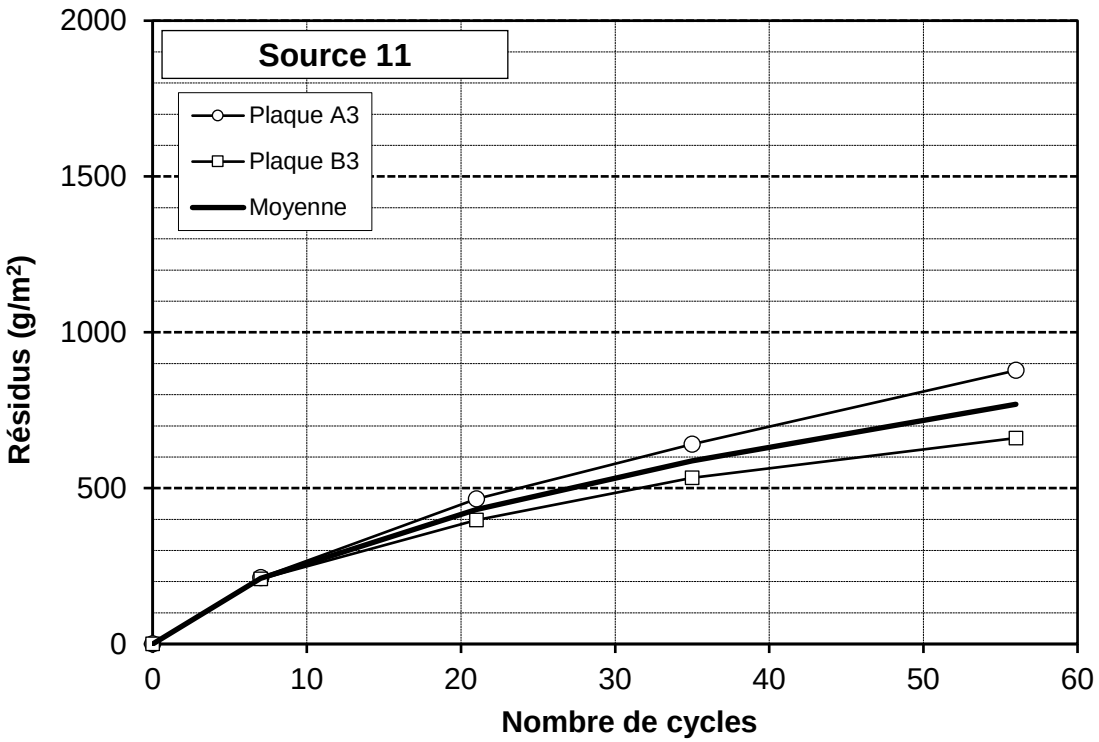

Source 8
Plaque A1
Plaque B1
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

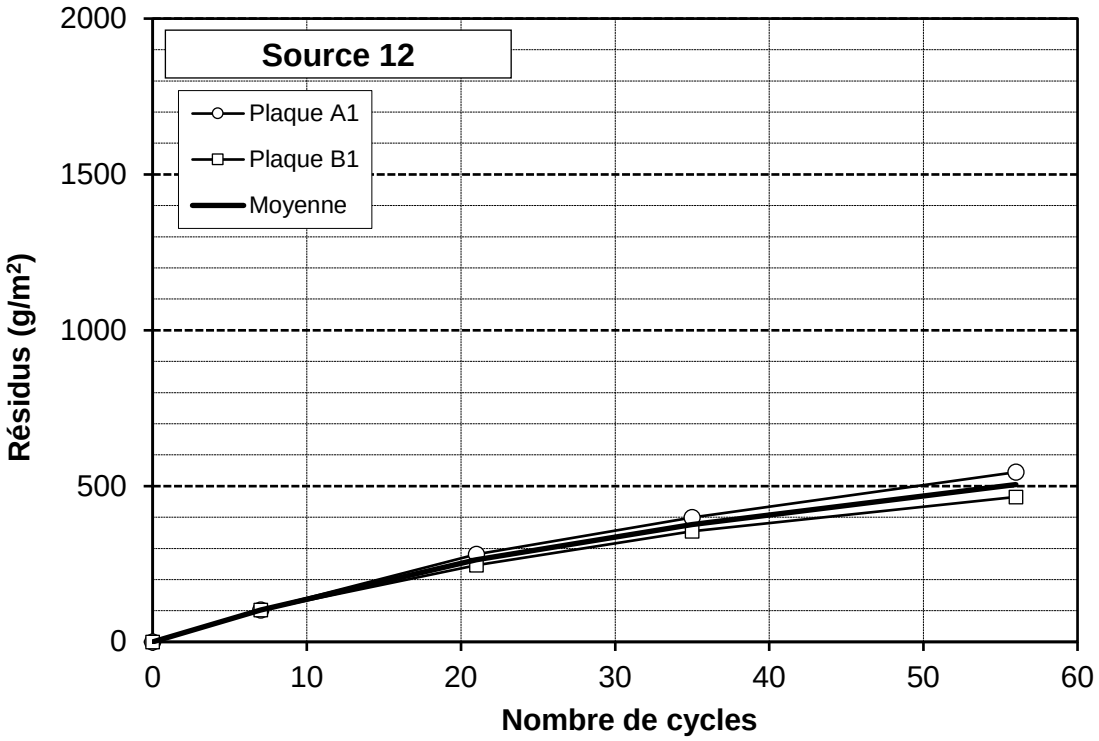

Source 8
Plaque A3
Plaque B3
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

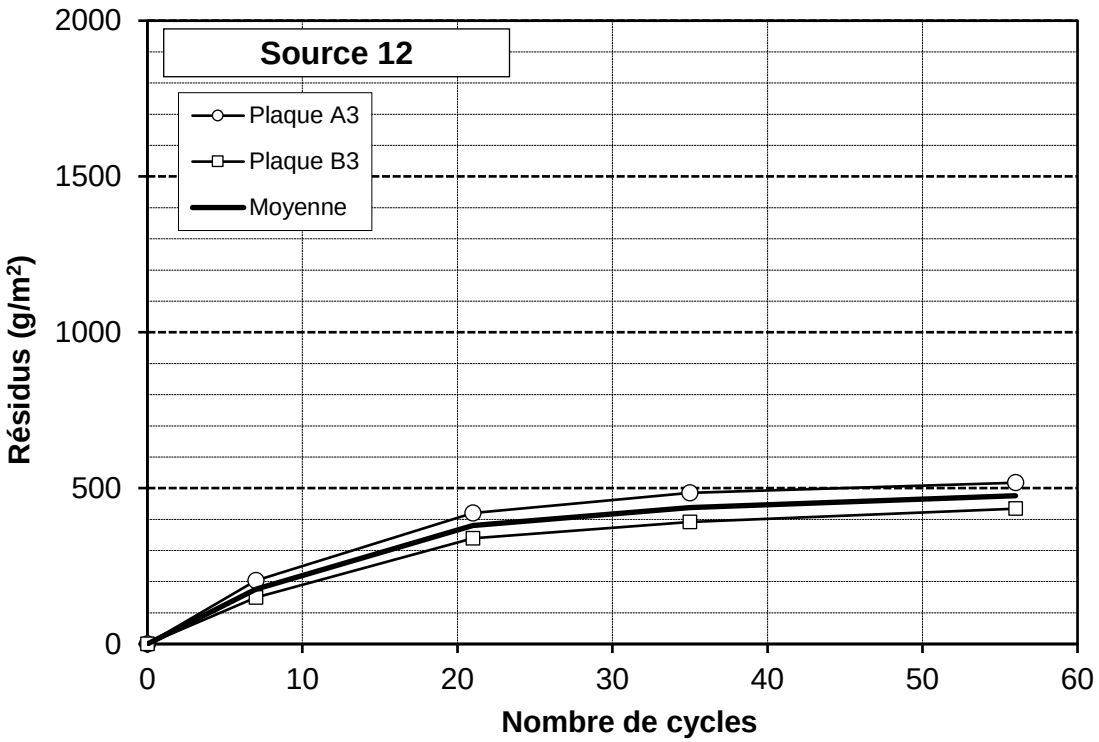

Source 8
Plaque A2
Plaque B2
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

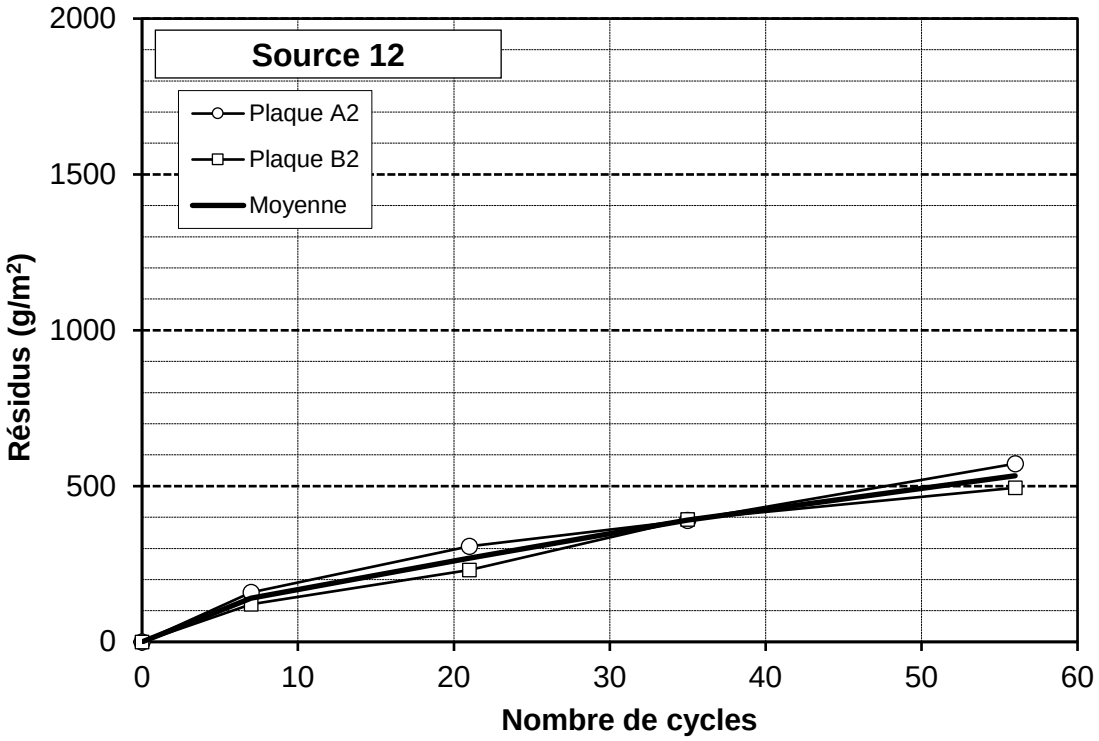

Source 11
Plaque A1
Plaque B1
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

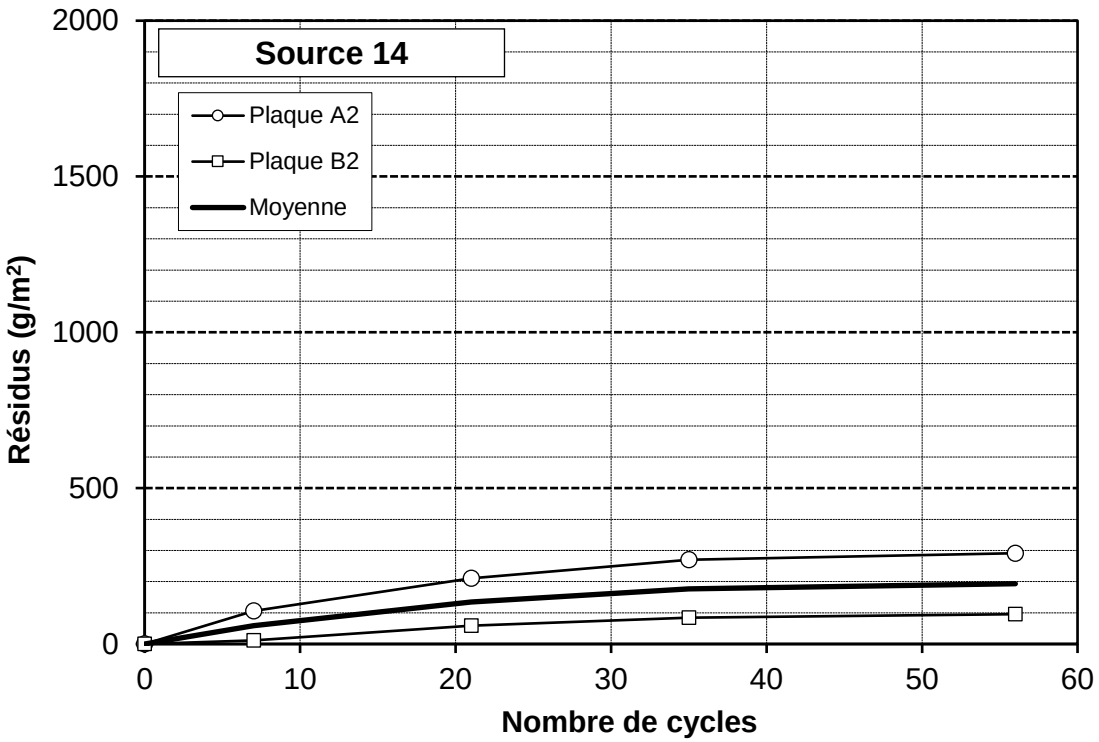

Source 11
Plaque A2
Plaque B2
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

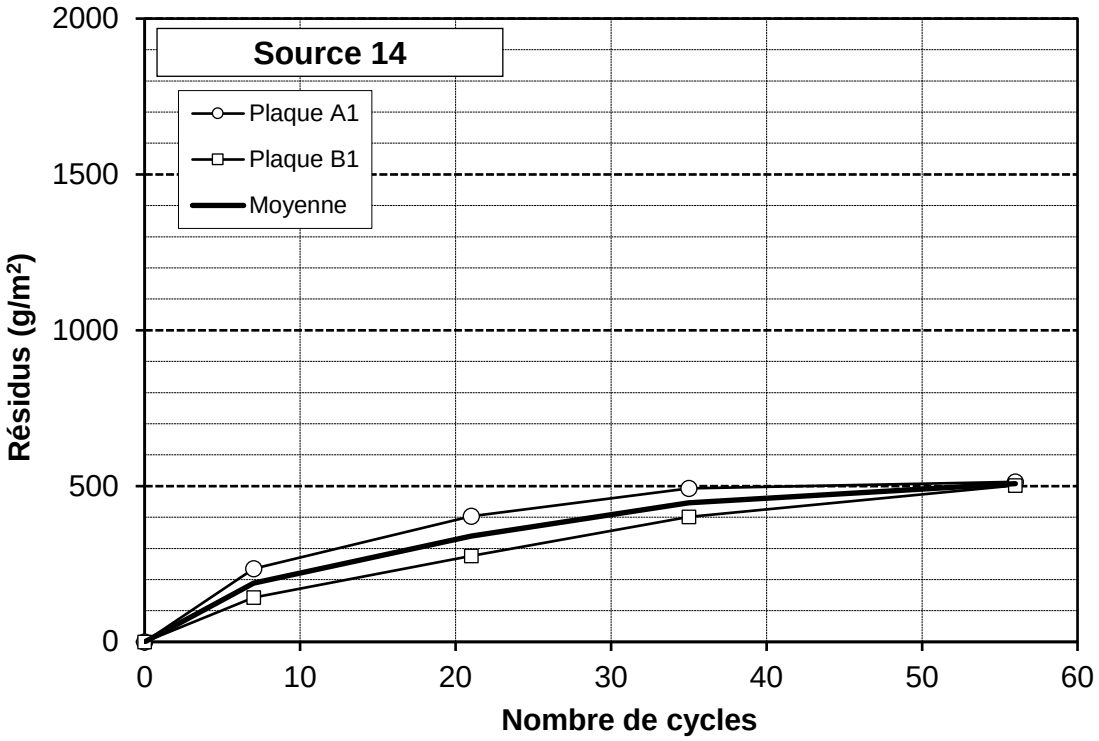

Source 11
Plaque A3
Plaque B3
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

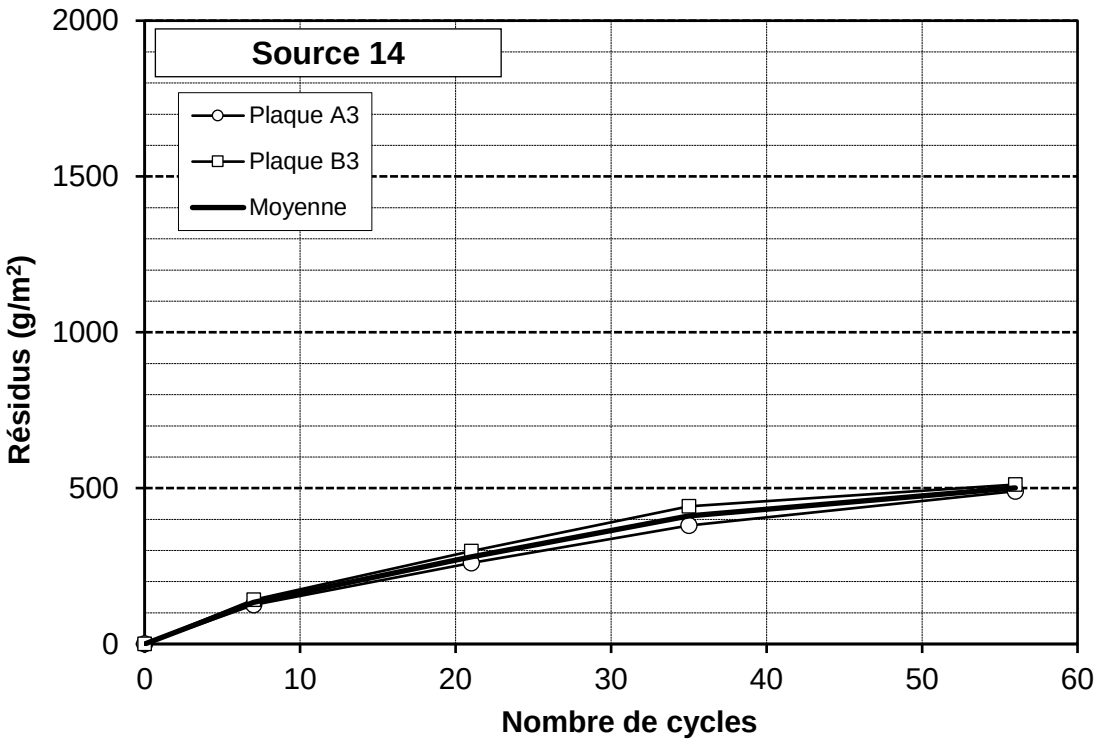

Source 12
Plaque A1
Plaque B1
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60


Source 12
Plaque A3
Plaque B3
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60


Source 12
Plaque A2
Plaque B2
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60


Source 14
Plaque A2
Plaque B2
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

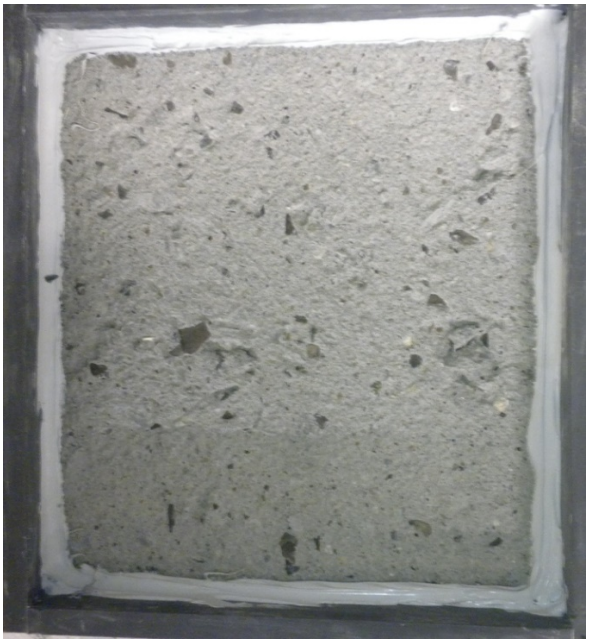

Source 14
Plaque A1
Plaque B1
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60


Source 14
Plaque A3
Plaque B3
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

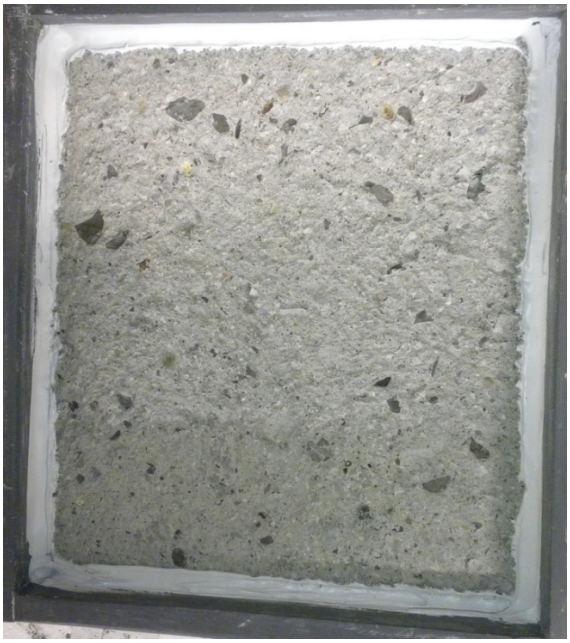
État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque A1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque A2



État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque B1



État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque B2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque C1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 1 – plaque C2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque A1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque A2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque B1

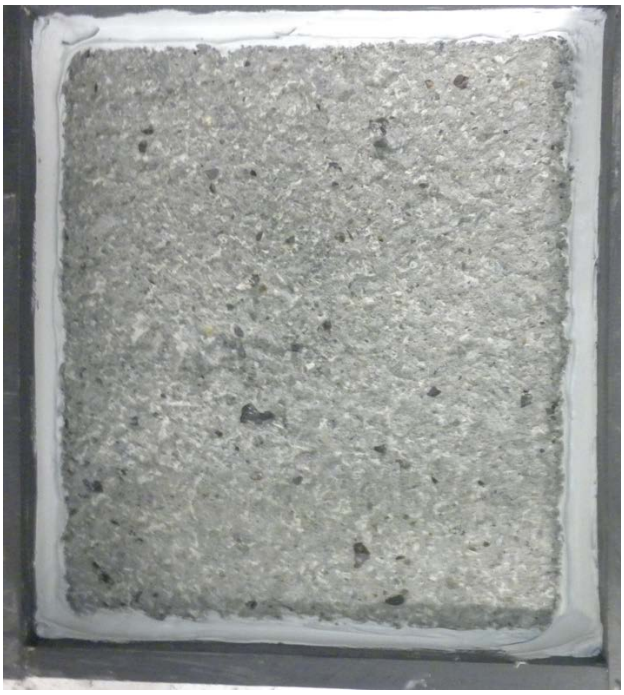
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque B2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque C1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 2 – plaque C2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque A1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque A2



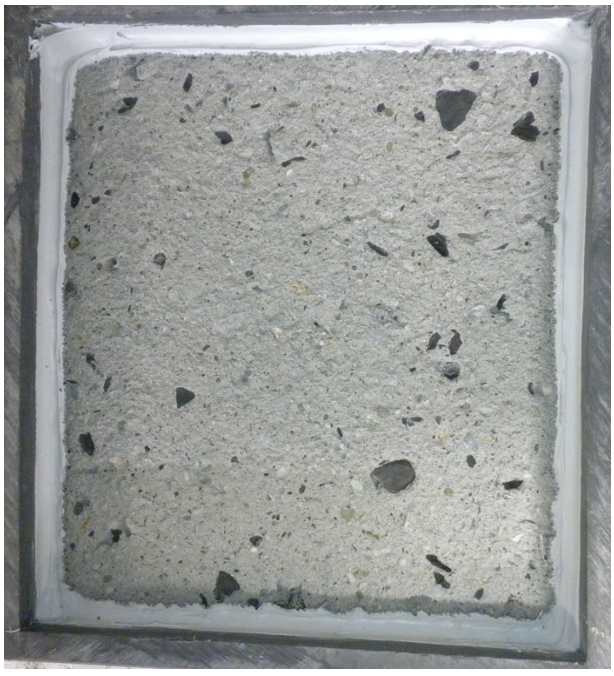
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque B1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque B2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque C1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 3 – plaque C2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque A1



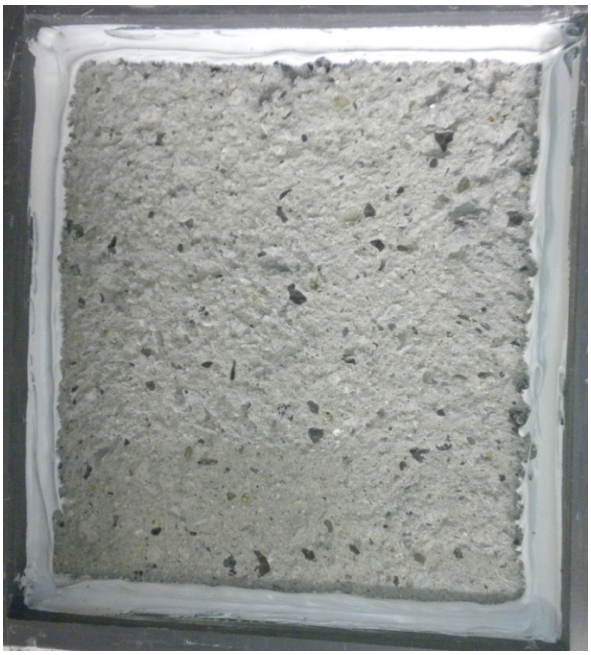
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque A2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque C1

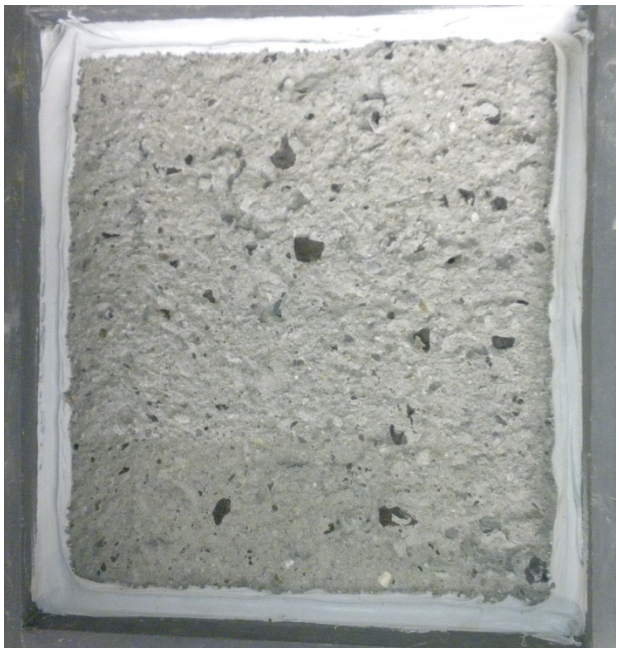
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque C2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque C1

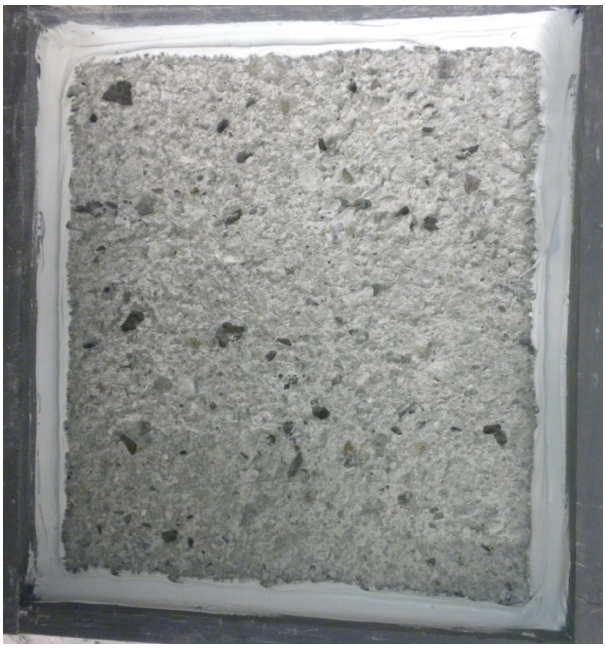
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 8 – plaque C2



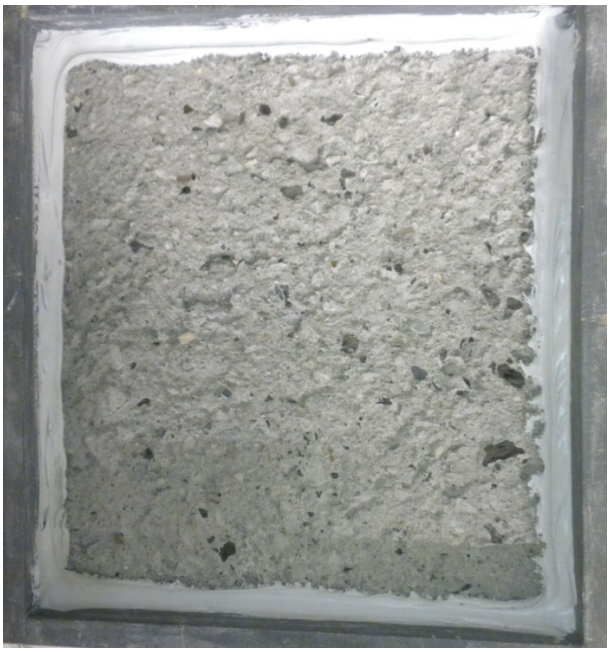
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque A1



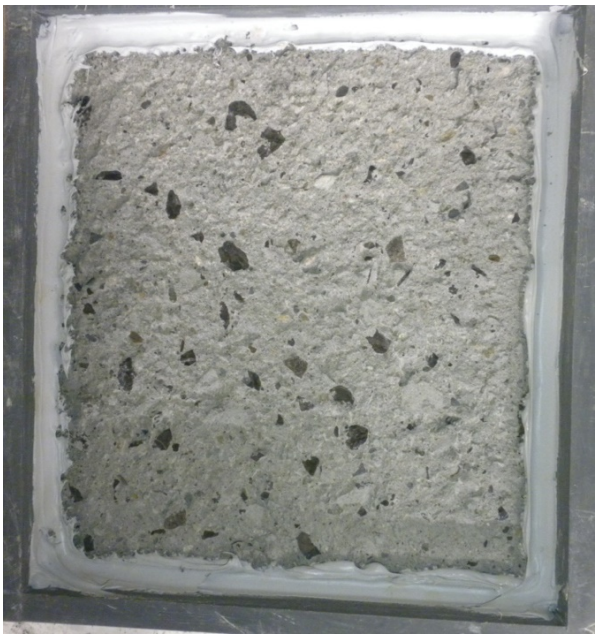
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque A2



État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque B1



État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque B2



État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque C1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 11 – plaque C2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque A1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque A2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque B1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque B2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque C1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 12 – plaque C2

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque A1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque A2

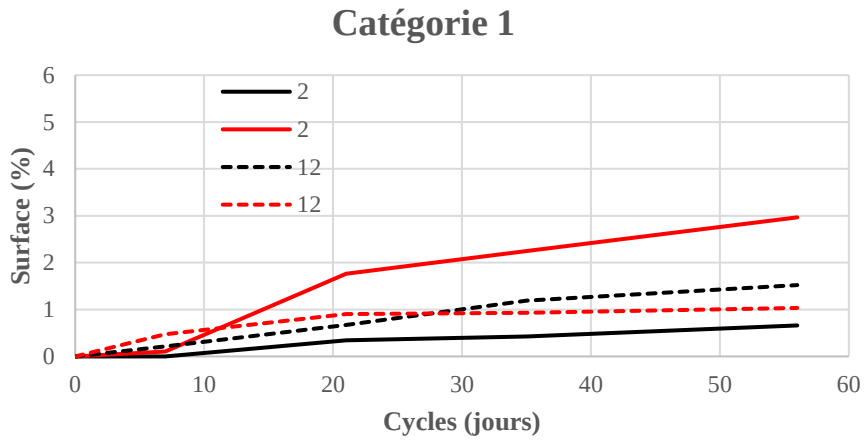
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque B1

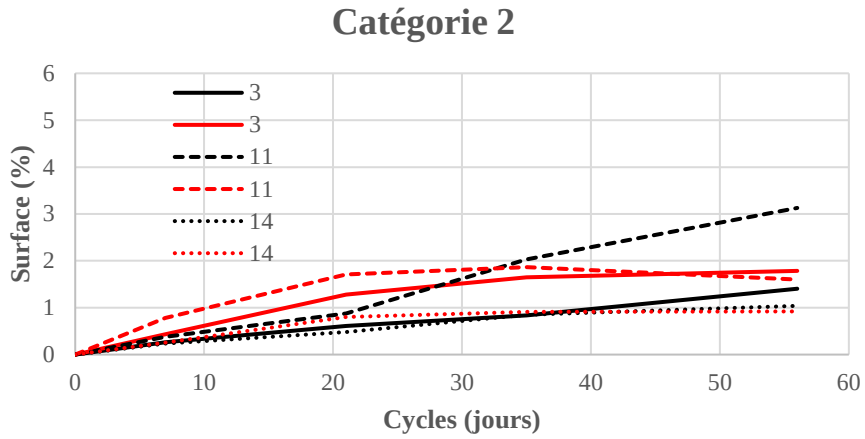
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque B2

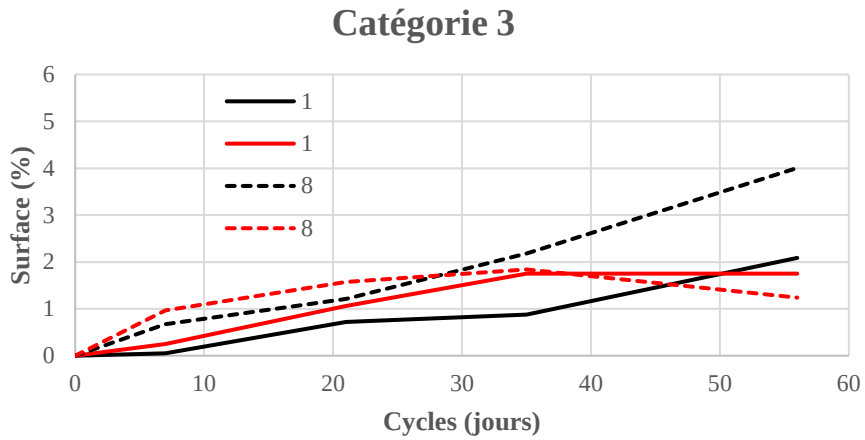
État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque C1

État de surface à 56 cycles – phase 1 – source 14 – plaque C2

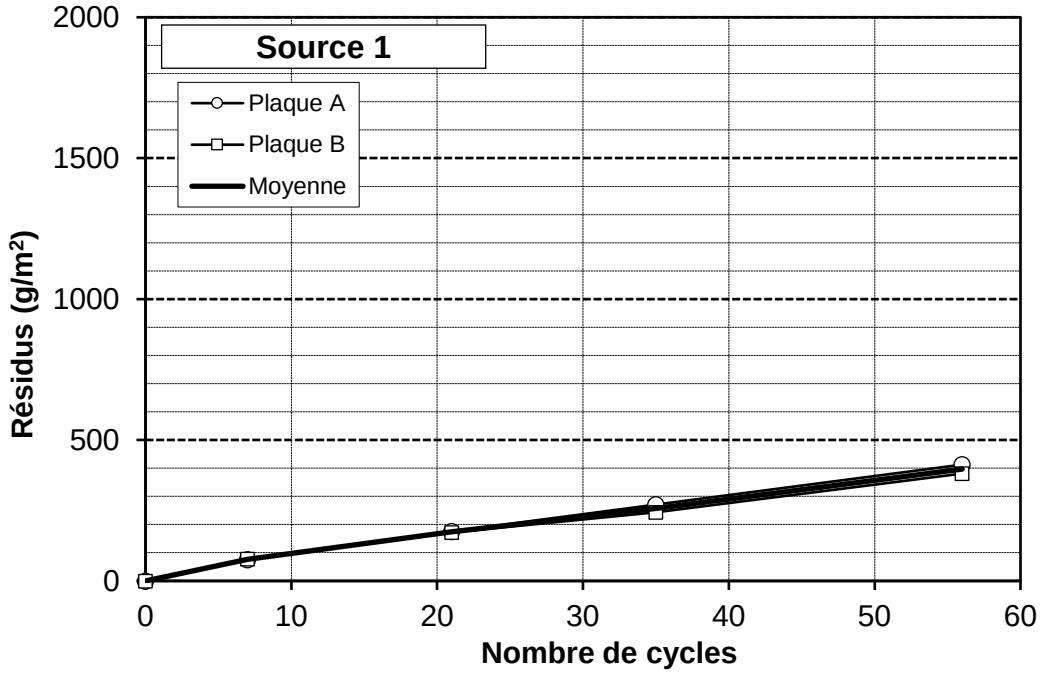
ANNEXE 4 – Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 1

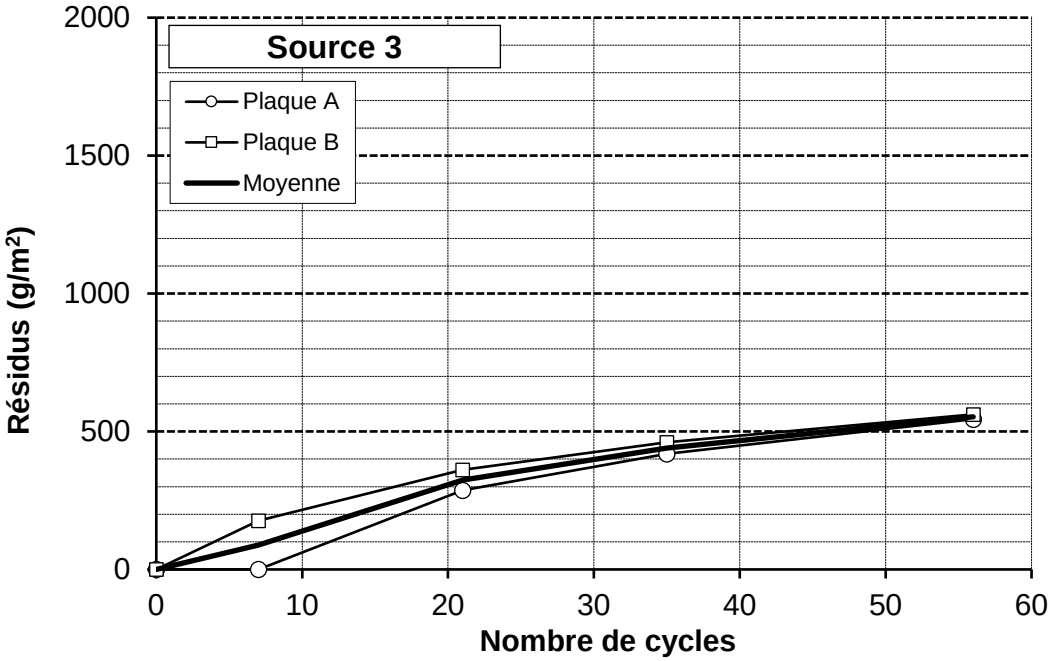


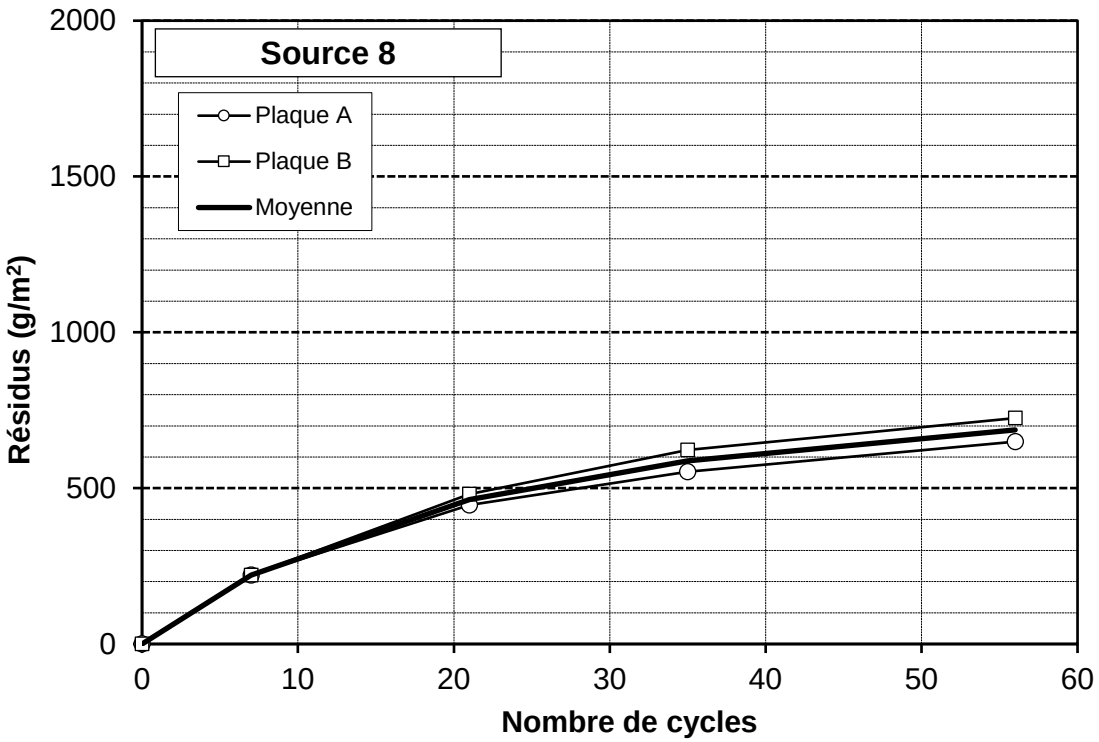


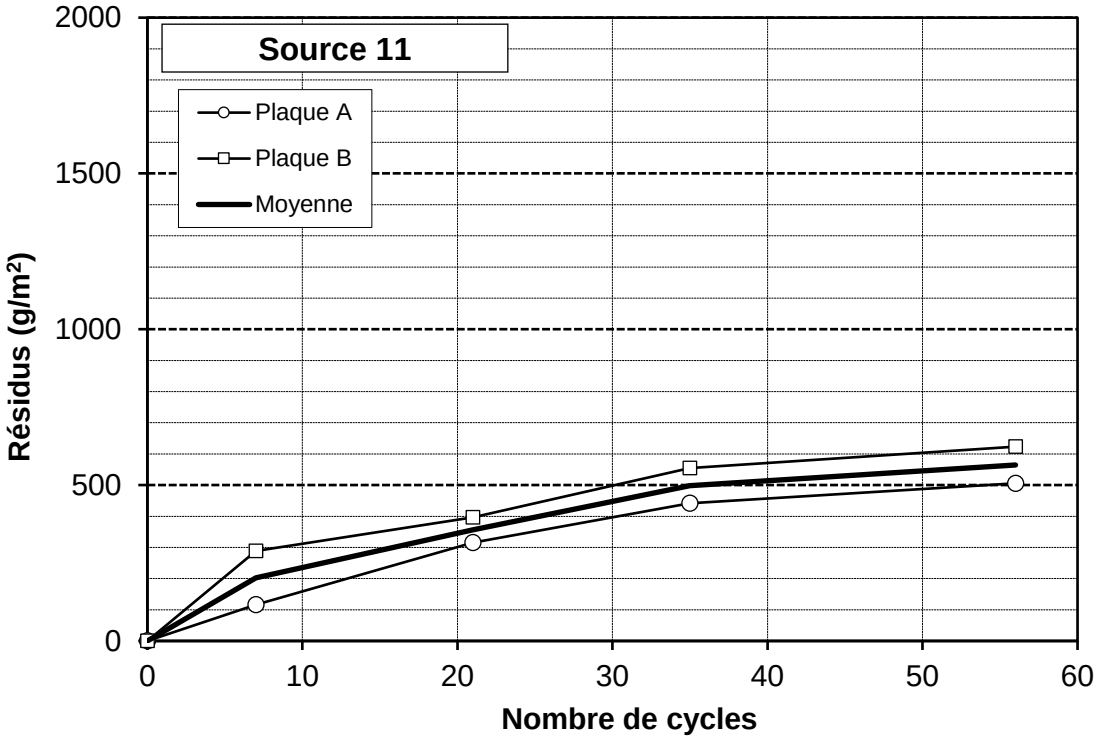


ANNEXE 5 – Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 2

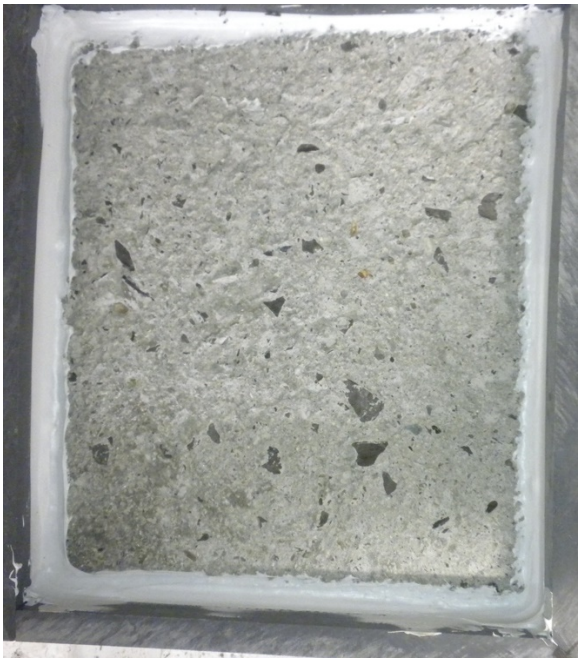





Source 8
Plaque A
Plaque B
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60


Source 11
Plaque A
Plaque B
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 2



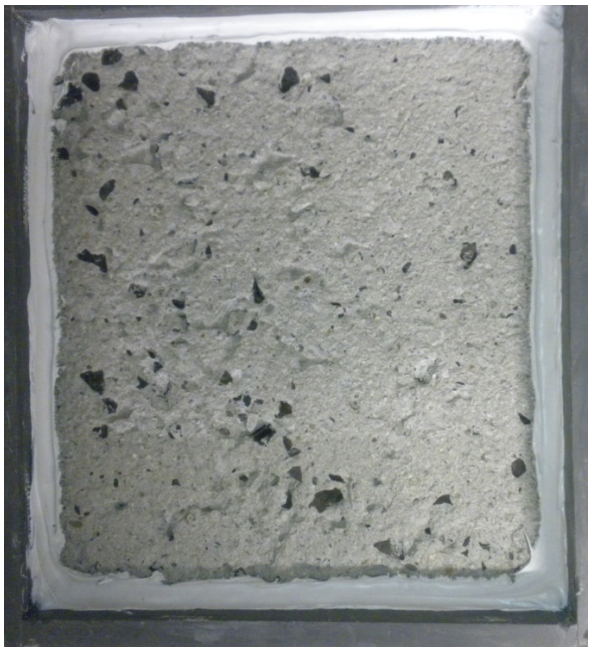
État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 1 – plaque A

État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 1 – plaque B

État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 3 – plaque A

État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 3 – plaque B

État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 8 – plaque A

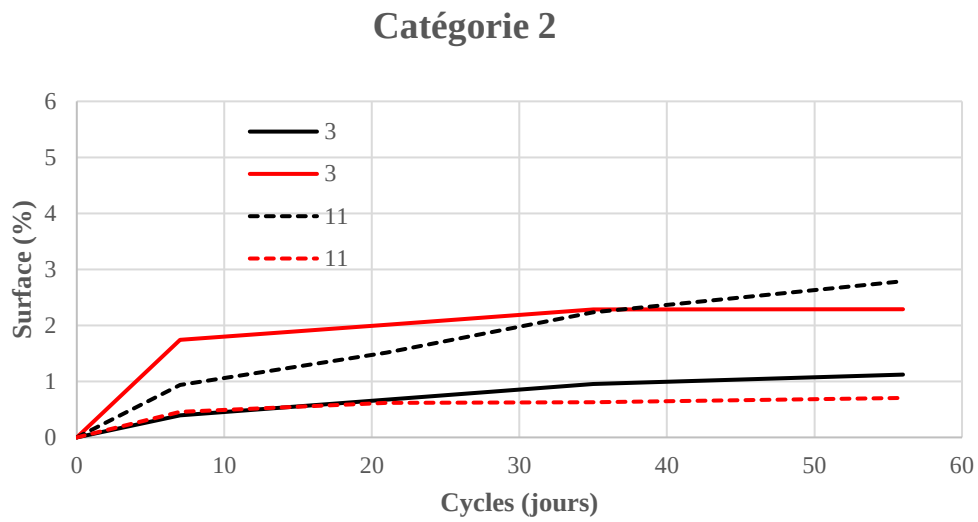


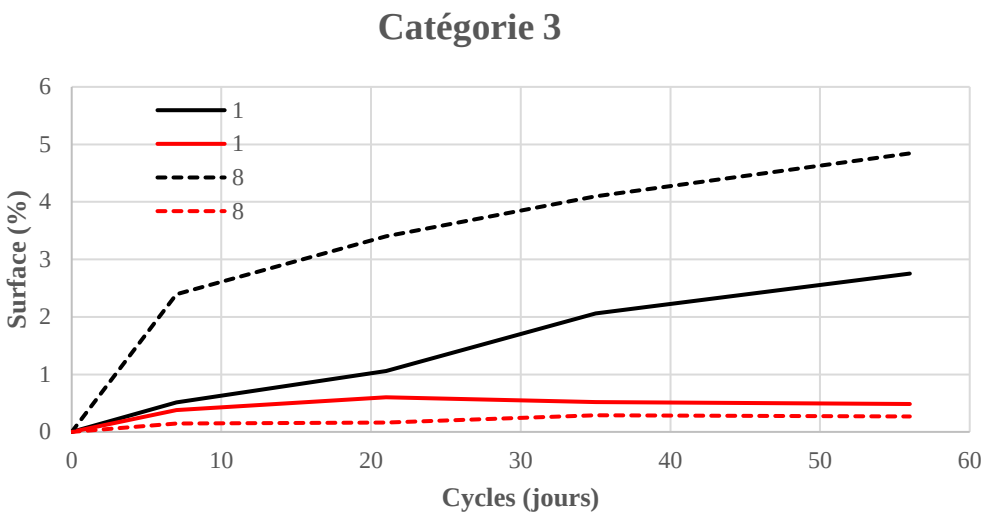
État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 8 – plaque B

État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 11 – plaque A

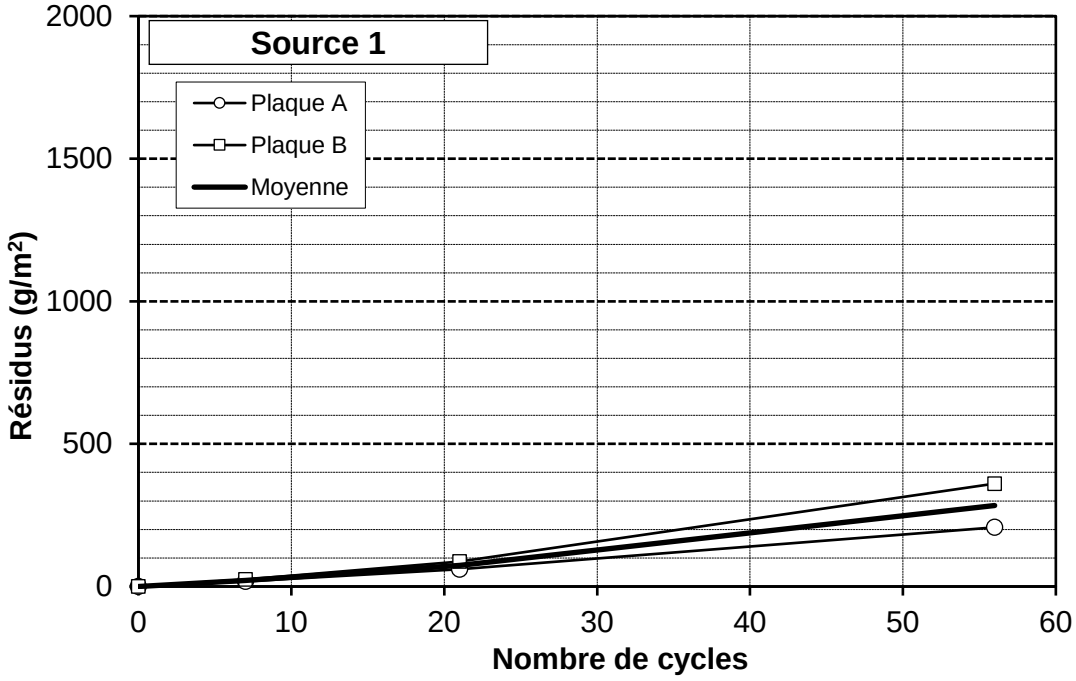
État de surface à 56 cycles – phase 2 – source 11 – plaque B

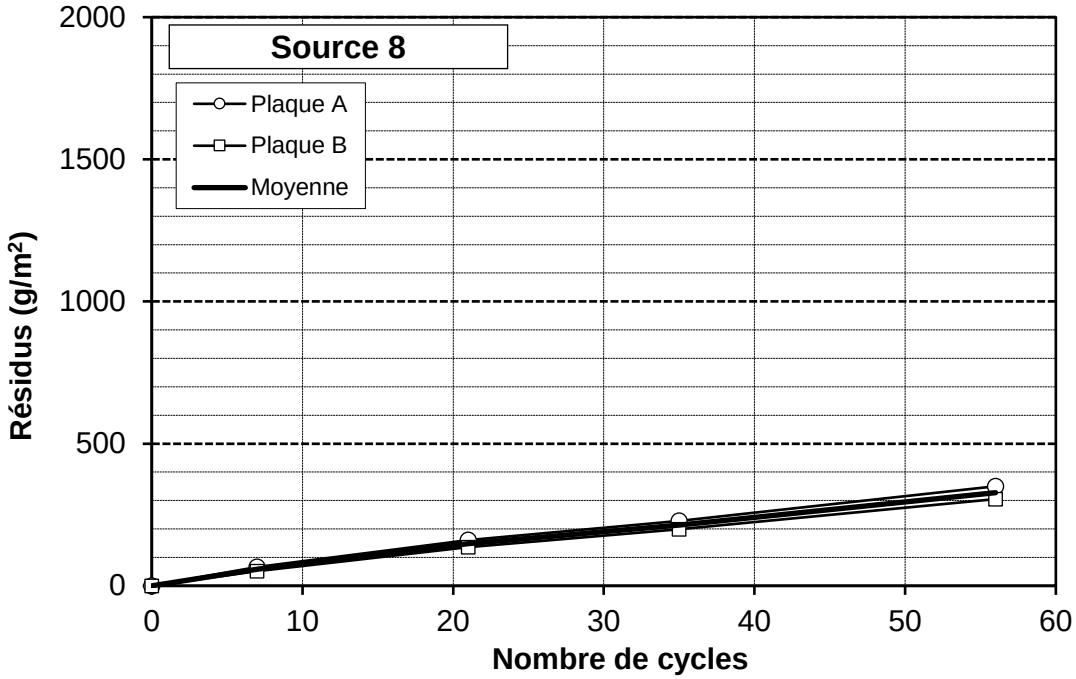
ANNEXE 6 – Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 2





ANNEXE 7 – Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 3





État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 3

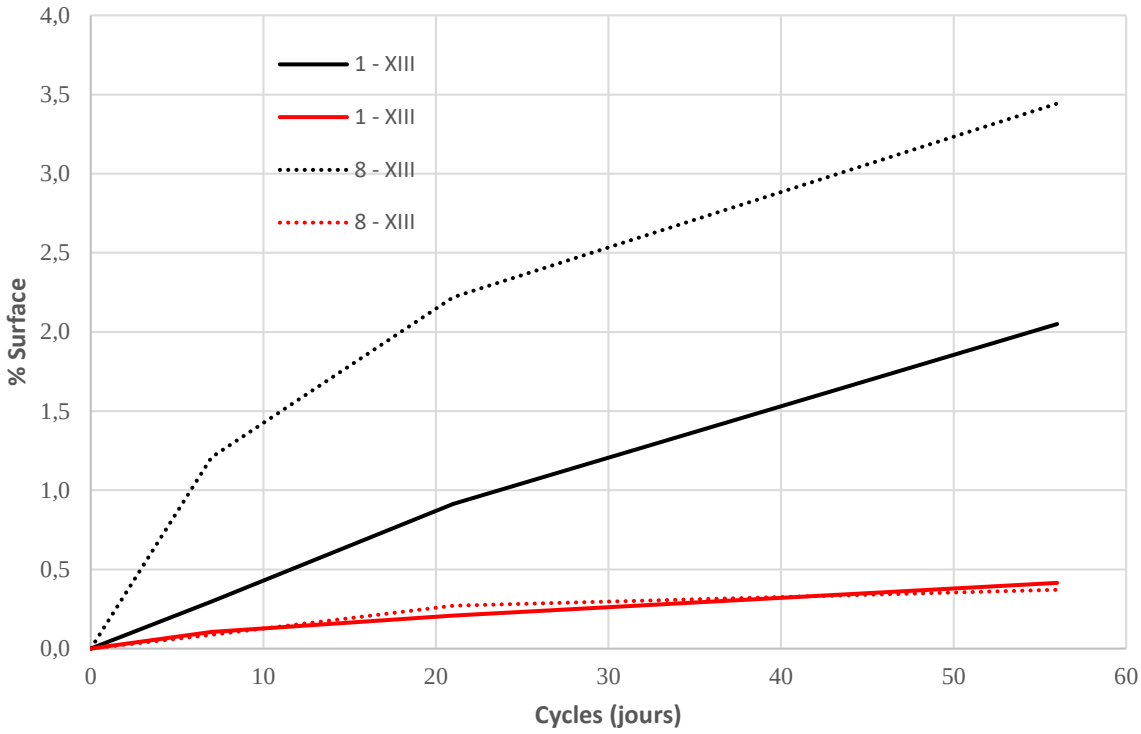
État de surface à 56 cycles – phase 3 – source 1 – plaque A

État de surface à 56 cycles – phase 3 – source 1 – plaque B

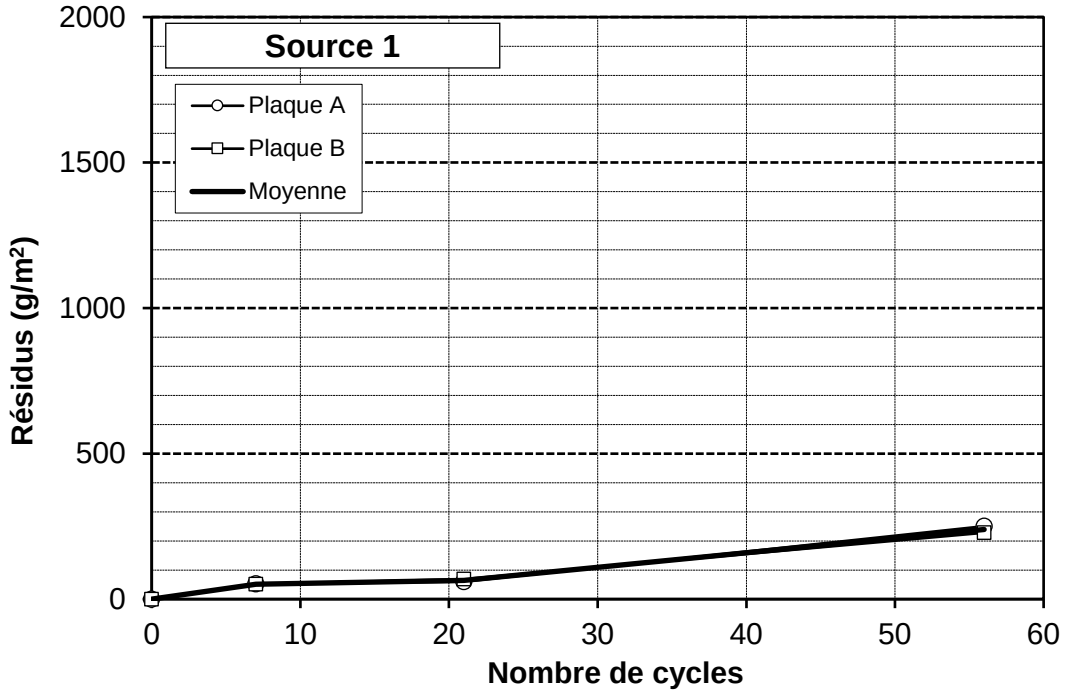
État de surface à 56 cycles – phase 3 – source 8 – plaque A

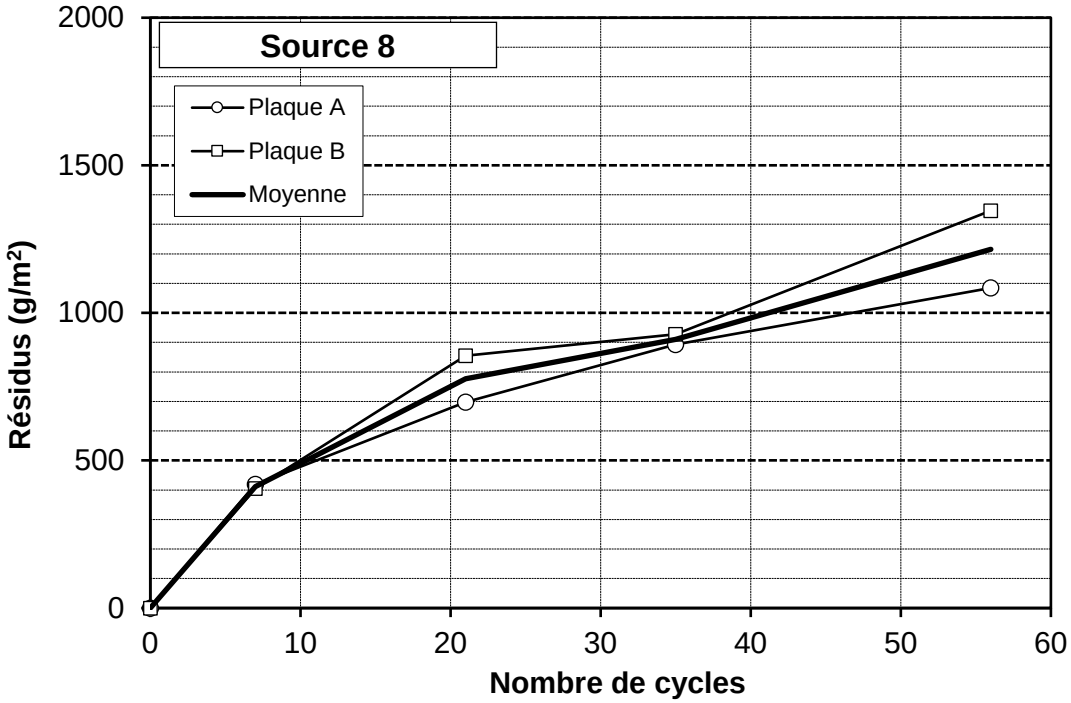
État de surface à 56 cycles – phase 3 – source 8 – plaque B

ANNEXE 8 – Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 3



ANNEXE 9 – Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 4





État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 4

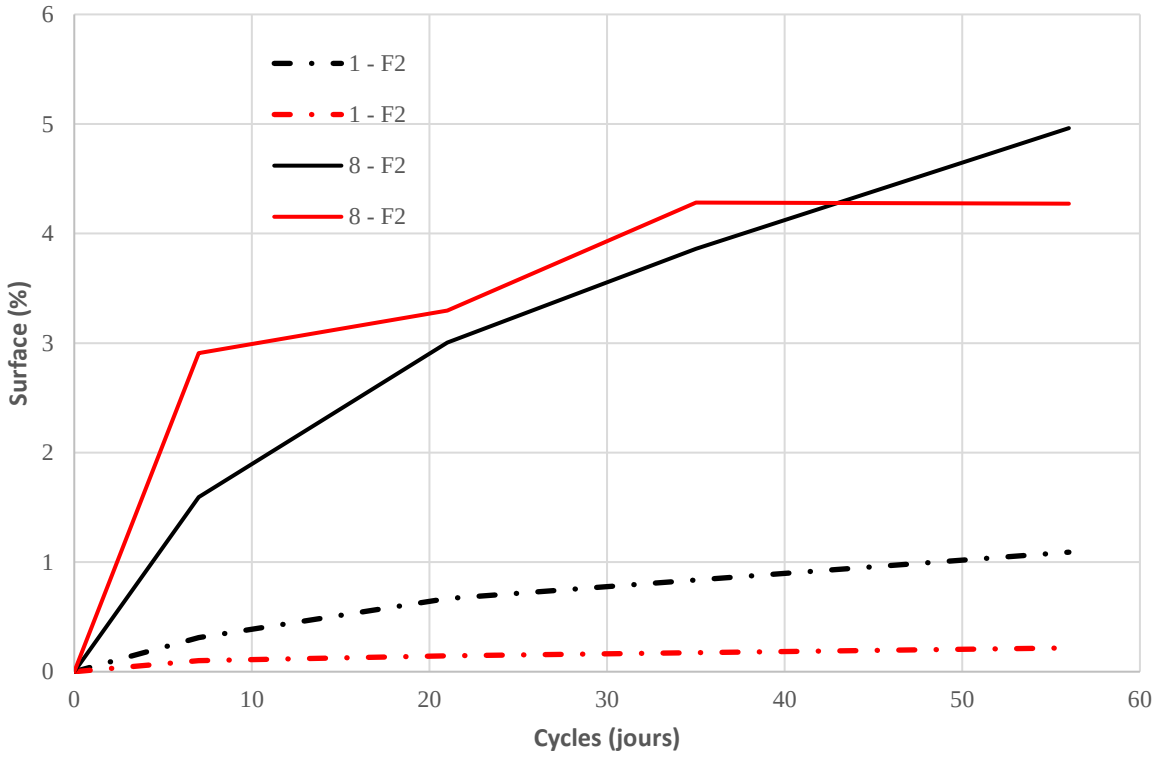
État de surface à 56 cycles – phase 4 – source 1 – plaque A

État de surface à 56 cycles – phase 4 – source 1 – plaque B

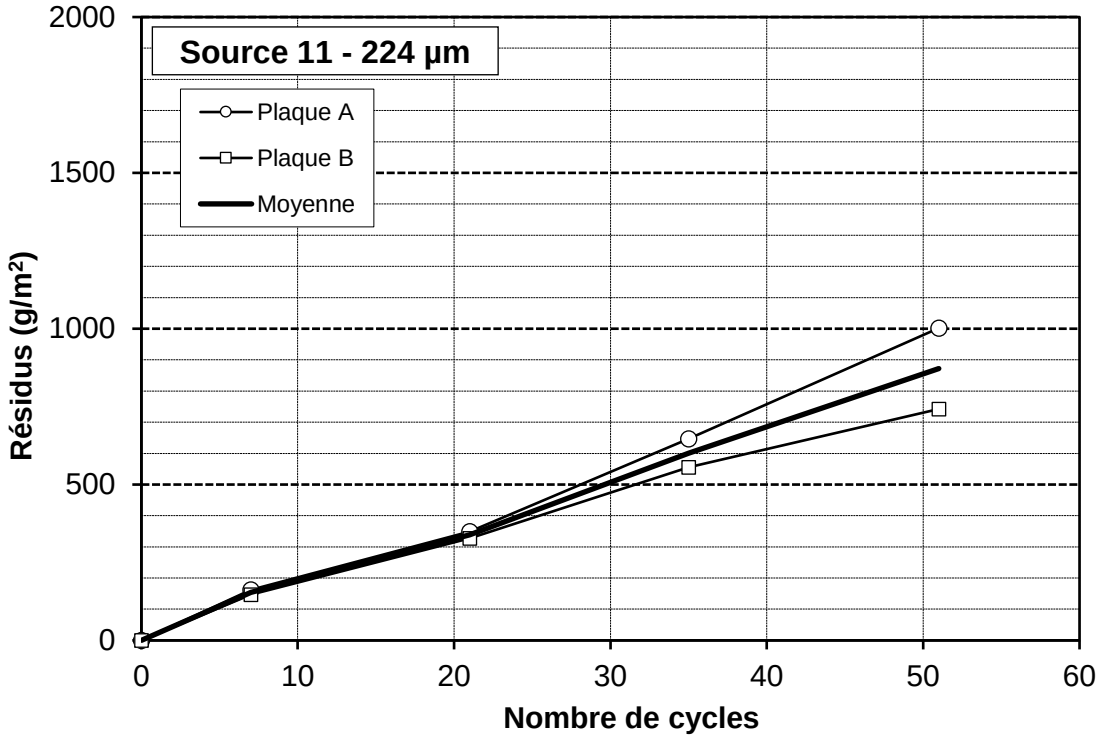
État de surface à 56 cycles – phase 4 – source 8 – plaque A

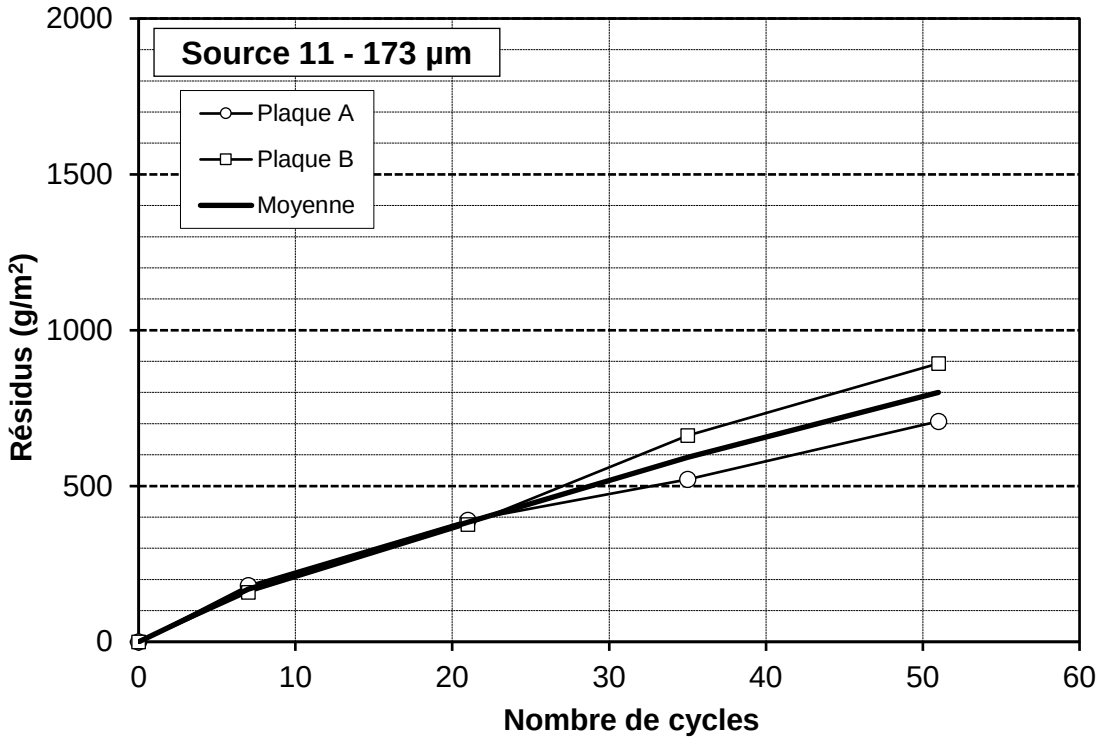
État de surface à 56 cycles – phase 4 – source 8 – plaque B

ANNEXE 10 –Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 4

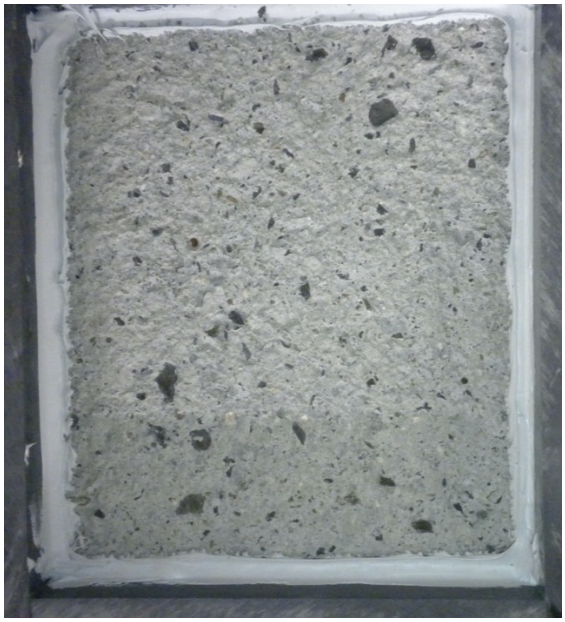


ANNEXE 11 – Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 5



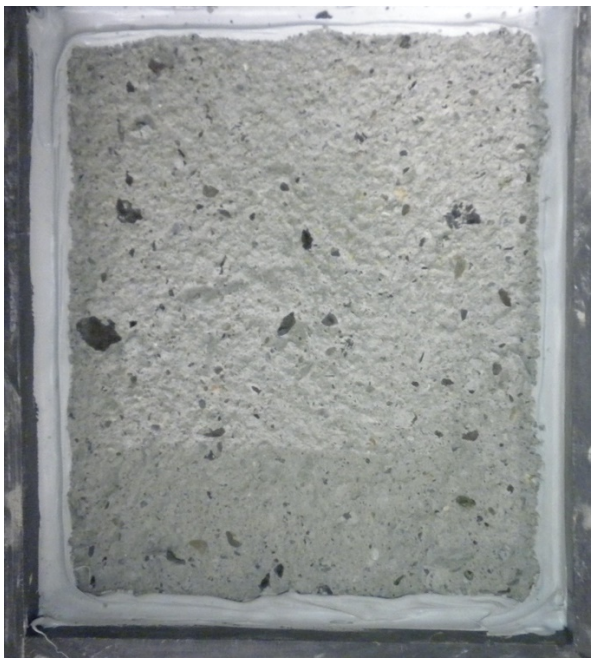


État de surface des plaques d'écaillage à 51 cycles de gel-dégel de la phase 5



État de surface à 51 cycles – phase 5 – source 11 – 224 µm – plaque A

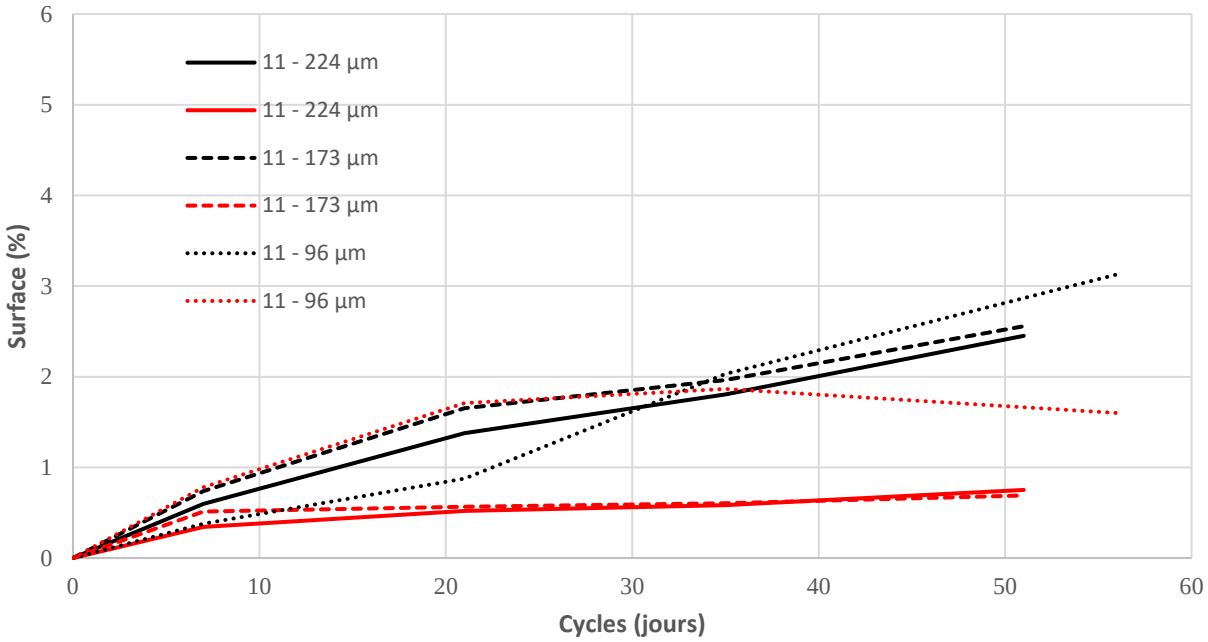
État de surface à 51 cycles – phase 5 – source 11 – 224 µm – plaque B



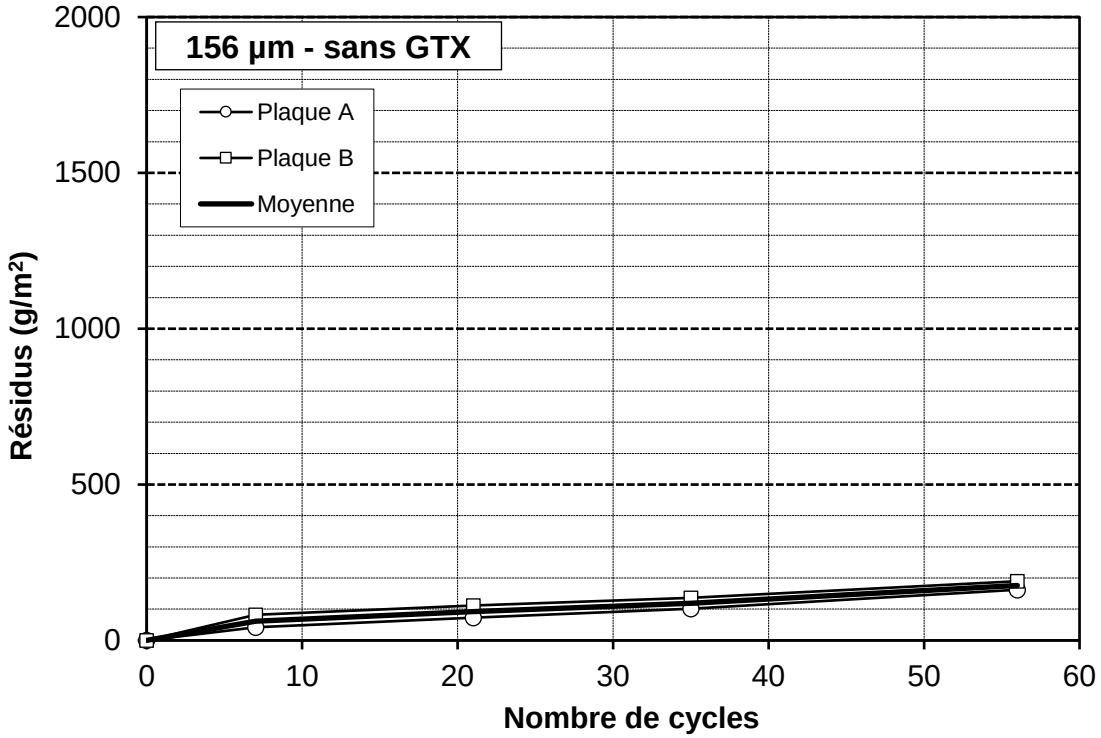
État de surface à 51 cycles – phase 5 – source 11 – 173 µm – plaque A

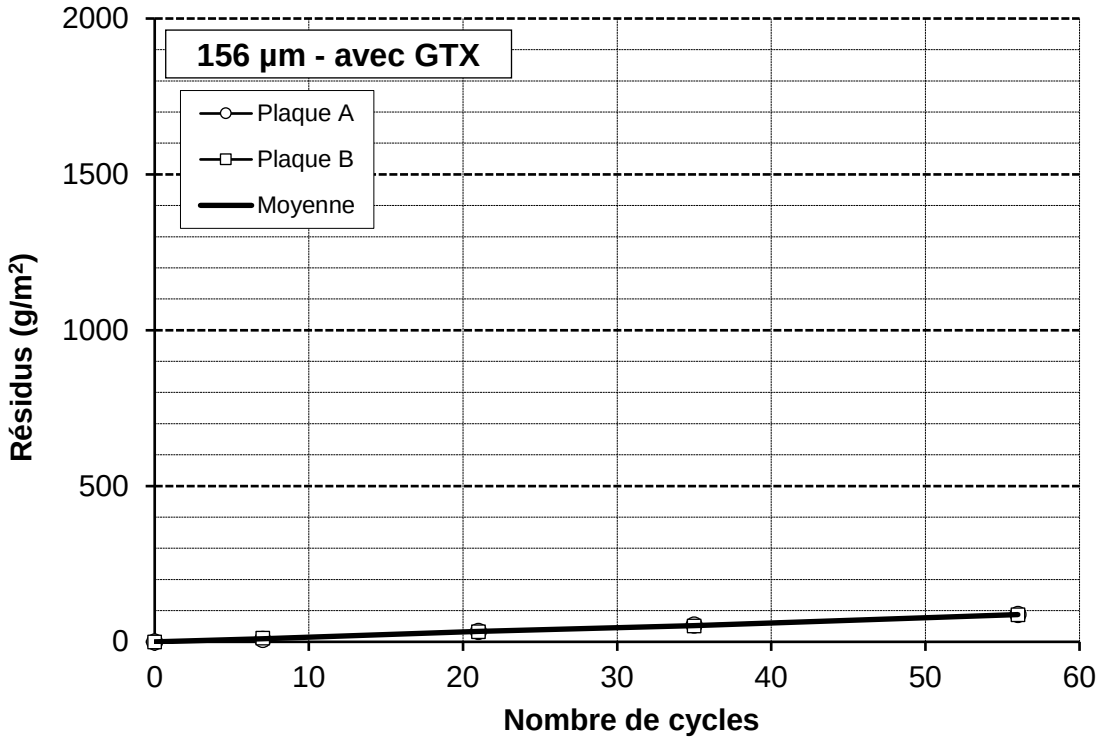
État de surface à 51 cycles – phase 5 – source 11 – 173 µm – plaque B

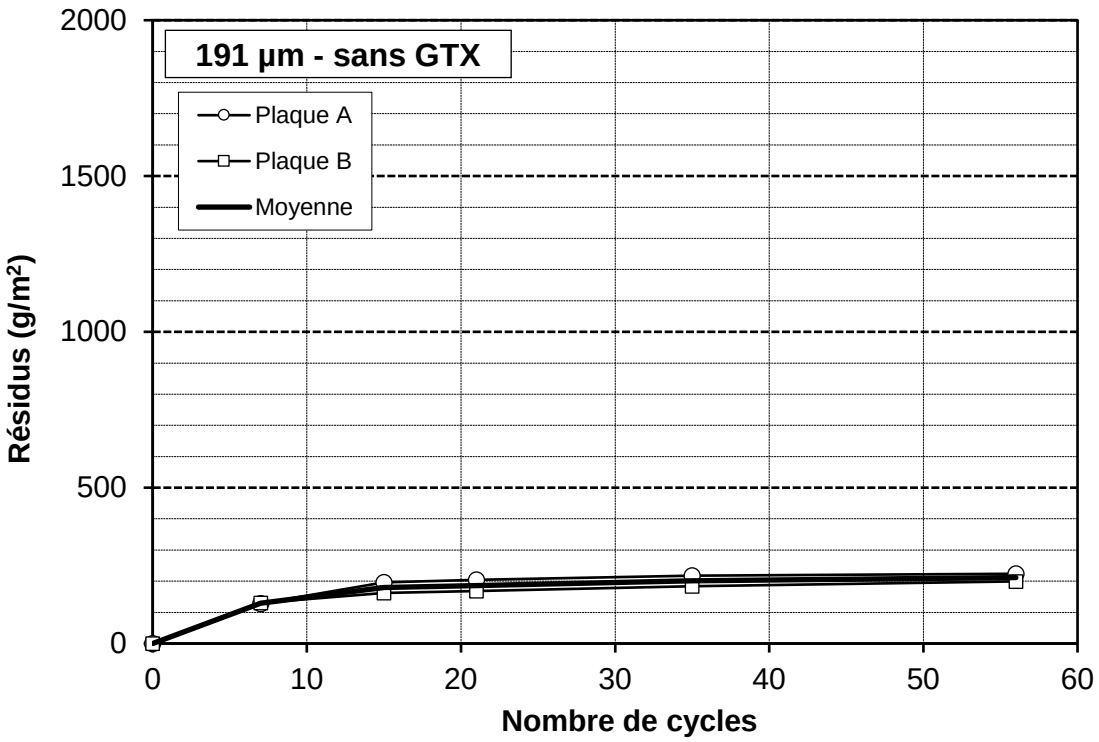
ANNEXE 12 –Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 5

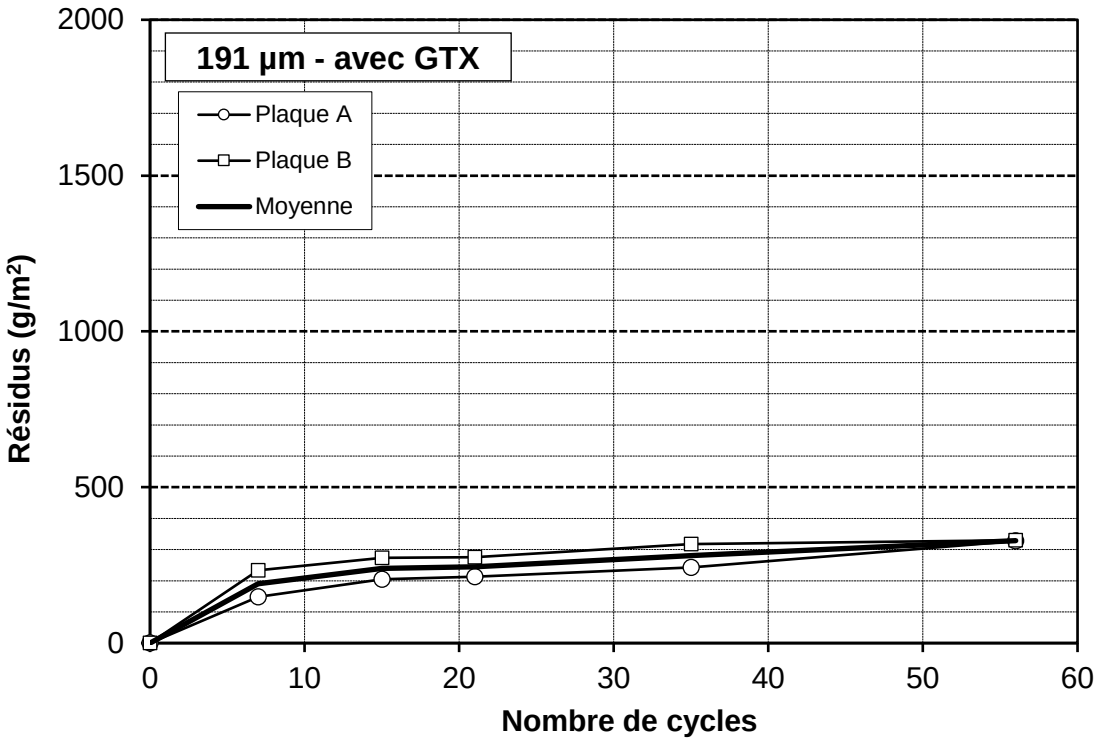


ANNEXE 13 – Évolution des pertes massiques dues à l'écaillage des bétons de la phase 6






191 µm - sans GTX
Plaque A
Plaque B
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60


191 µm - avec GTX
Plaque A
Plaque B
Moyenne
Résidus (g/m²)
Nombre de cycles
0
500
1000
1500
2000
0
10
20
30
40
50
60

État de surface des plaques d'écaillage à 56 cycles de gel-dégel de la phase 6

État de surface à 56 cycles – phase 6 - sans géotextile – 230 µm – plaque A

État de surface à 56 cycles – phase 6 - sans géotextile – 230 µm – plaque B B

État de surface à 56 cycles – phase 6 - avec géotextile – 230 µm – plaque A

État de surface à 56 cycles – phase 6 - avec géotextile – 230 µm – plaque B

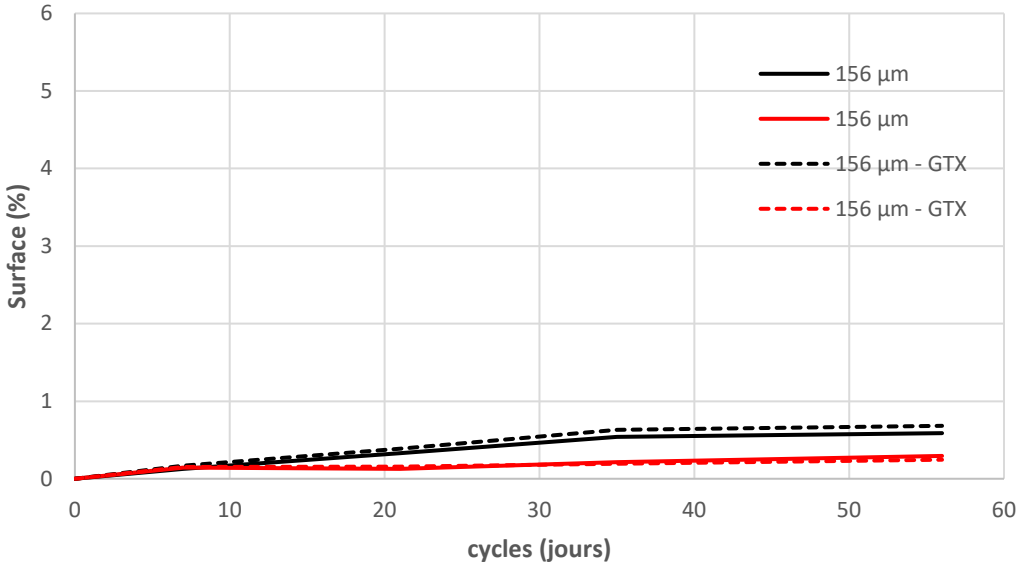
État de surface à 56 cycles – phase 6 - sans géotextile – 191 µm – plaque A

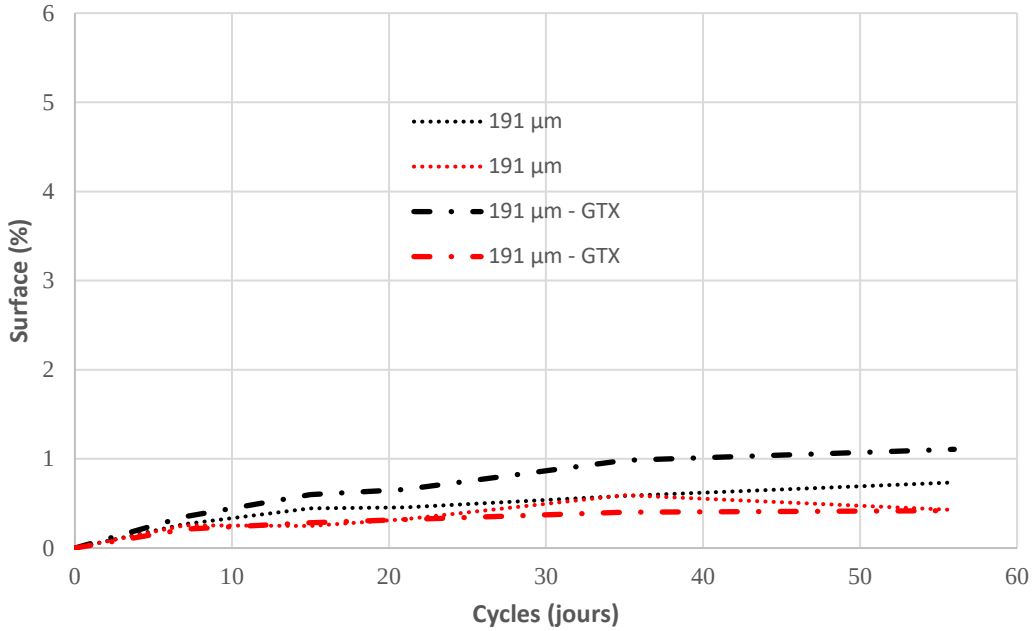
État de surface à 56 cycles – phase 6 - sans géotextile – 191 µm – plaque B

État de surface à 56 cycles – phase 6 - avec géotextile – 191 µm – plaque A

État de surface à 56 cycles – phase 6 - avec géotextile – 191 µm – plaque B

ANNEXE 14 – Évolution des éclatements (noir) et des dégarnissements (rouge) des bétons de la phase 6





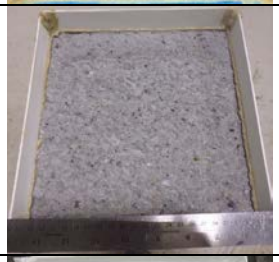
ANNEXE 15 – Résultats détaillés des tests d'écaillage interlaboratoires

Tableau A14.1 - Évolution de la masse des débris

Masse des débris (g/m^2)		Nombre de cycles de gel/dégel				
		0	7	21	35	56
Labo 1	Plaque 1	0	30	220	400	520
	Plaque 2	0	10	130	240	300
	Moyenne	0	20	175	320	410
Labo 2	Plaque 1	0	70	330	480	610
	Plaque 2	0	80	320	500	610
	Moyenne	0	75	325	490	610
Labo 3	Plaque 1	0	40	350	590	950
	Plaque 2	0	70	390	590	990
	Moyenne	0	55	370	590	970
Labo 4	Plaque 1	0	10	150	240	360
	Plaque 2	0	40	250	390	540
	Moyenne	0	25	200	315	450
Labo 5	Plaque 1	0	87	530	1044	1401
	Plaque 2	0	62	550	936	1266
	Moyenne	0	75	540	990	1333
Labo 6	Plaque 1*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Plaque 2	0	5	235	560	751
	Moyenne	0	5	235	560	751

* fuite de solution saline

Tableau A14.2 – Aspect visuel final des plaques d'écaillage

	Plaque 1	Plaque 2
Labo 1		
Labo 2		
Labo 3		
Labo 4		
Labo 5		
Labo 6		Fuite de solution saline