

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

ÉTUDE DE LA DURABILITÉ À L'ÉCAILLAGE EN PRÉSENCE DE SEL FONDANT DES BÉTONS AVEC LIANT TERNAIRE

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Pierre-Olivier MORIN-MORISSETTE

Jury : Richard GAGNÉ (directeur)
Arezki TAGNIT-HAMOU
Nadia POULIOT

À ma famille qui m'a toujours soutenu dans mes projets.

RÉSUMÉ

L'écaillage de la surface du béton dû aux sels fondants est un phénomène dont les mécanismes sont relativement peu connus. Plusieurs publications et plusieurs recherches se sont penchées sur cette problématique de durabilité du béton. Encore aujourd'hui, aucune théorie prise individuellement ne permet d'expliquer entièrement les causes de ce phénomène et le rôle protecteur d'un bon réseau de bulle d'air sur les bétons qui sont dans des conditions à risque.

À prime à bord, les tests sous leur forme actuelle, peuvent sembler moins bien adaptés lorsque l'utilisation de liant ternaire est préférée au liant avec seulement du ciment Portland. Cette recherche s'intéresse donc à valider la sévérité du test d'écaillage BNQ 2621-905 lorsqu'on utilise des liants ternaires. Ce projet se penche également sur l'effet du type et la durée de la cure, du type de superplastifiant utilisé, de la variation du \bar{L} et de l'utilisation d'un granulat marginal sur les résistances à l'écaillage des bétons avec liant ternaire.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet démontrent qu'il est possible d'avoir des résultats qui satisfont la norme d'écaillage BNQ 2621-905 avec des paramètres de formulations d'un béton de type V-S avec presque tous les liants ternaires utilisés. De plus, lorsque le réseau d'air est de bonne qualité ($\bar{L} < 230 \mu\text{m}$) l'utilisation de superplastifiant PCP ou PNS ne semble pas d'avoir d'effet marqué. Le facteur d'espacement, actuellement prescrit dans la norme CSA A23.1, moyen inférieur à $230 \mu\text{m}$ avec aucune valeur dépassant $260 \mu\text{m}$ permet d'obtenir de bons résultats à l'écaillage en laboratoire pour le liant C. Finalement, l'utilisation d'un granulat marginal au micro-Deval peut avoir un effet sur la quantité de débris de surface d'un échantillon soumis au gel-dégel.

Mots-clés : Durabilité des bétons, Liant ternaire, Écaillage, Gel-dégel, Sels fondant, Granulats, Éclatements, Pop-out, Masse de débris, Agent entraîneur d'air, Superplastifiant, Facteur d'espacement, Laitier, Cendre volante et Fumée de silice, Micro-Deval, gel-dégel non confiné.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Richard Gagné et Olivier Bonneau pour leur grand soutien et leurs conseils avisés tout au long du projet ainsi que tous les membres du Ministère des Transports qui ont participé au financement et à la réalisation de ce projet.

Je tiens également à remercier Ariane Maltais-Schiettekatte, Régis Bouchard et Rajko Vojnovic pour leur grande aide lors de la phase expérimentale du projet.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
2.1 Modèle d'écaillage	3
2.1.1 Phénomène à l'origine de l'écaillage	3
2.1.2 Modèle de pression hydraulique	3
2.1.3 Modèle de pression osmotique	4
2.1.4 Modèle du choc thermique	6
2.1.5 Modèle de gradient de concentration ionique en surface	7
2.1.6 Modèle « glue-spall scaling »	8
2.2 Revue des tests d'écaillage selon les normes CSA, ASTM et BNQ	9
2.3 Influences de certaines caractéristiques du béton sur sa résistance à l'écaillage	11
2.3.1 Rapport E/C ou E/L	11
2.3.2 L'entraînement d'air	11
2.3.3 Résistance à la compression	11
2.4 Influence de l'utilisation de fumée de silice sur l'écaillage du béton	12
2.5 Influence de l'utilisation de cendres volantes sur l'écaillage du béton	12
2.5.1 Influence de la période de cure sur l'écaillage de béton ternaire avec cendre volante	12
2.5.2 Hypothèses pour expliquer la résistance à l'écaillage des bétons avec cendres volantes	16
2.6 Influence de l'ajout de laitier sur la durabilité à l'écaillage du béton	18
2.6.1 Influence de la période de cure sur l'écaillage de béton ternaire avec laitier de haut fourneau	18
2.6.2 Hypothèse et modèle expliquant les problèmes de résistance des ciments au laitier à l'écaillage	20
2.6.3 Comparaison entre les résultats à l'écaillage pour les bétons avec laitier de haut fourneau	21
2.7 Effet du produit de cure sur l'écaillage	23
CHAPITRE 3 BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	25
3.1 Contexte global du projet	25
3.2 Problématique	25
3.3 Objectifs	26
3.4 Méthodologie	26
3.4.1 Phase 1	27
3.4.2 Phase 2	29
3.4.3 Phase 3	29
3.4.4 Phase 4	30
CHAPITRE 4 MATÉRIAUX ET PROCÉDURES	31
4.1 Liants	31
4.2 Adjuvants	31
4.3 Granulat fin	31
4.4 Gros granulats	32
4.4.1 Gros granulat de référence	34
4.4.2 Gros granulat marginal	37

4.4.3	Caractérisation en laboratoire des éclatements de granulats produits lors de l'essai d'écaillage	38
4.5	Mélanges et procédures de gâchage	46
4.5.1	Procédure de gâchage.....	46
4.5.2	Échantillonnage.....	46
4.5.3	Mûrissement.....	48
4.5.4	Formulations	48
CHAPITRE 5	RÉSULTATS.....	55
5.1	Effet du type de liant – Phase 1	55
5.1.1	Résistance à la compression.....	55
5.1.2	Durabilité à l'écaillage.....	56
5.2	Phase 2 - Effet du type superplastifiant.....	57
5.2.1	Résistance à la compression.....	57
5.2.2	Résistance à l'écaillage.....	58
5.3	Effet du facteur d'espacement – Phase 3.....	59
5.3.1	Résistance à la compression.....	59
5.3.2	Résistance à l'écaillage.....	60
5.4	Phase 4 - Effet de l'utilisation d'un granulats marginal.....	61
5.4.1	Résistance à la compression.....	61
5.4.2	Résistance à l'écaillage.....	62
CHAPITRE 6	Analyse des résultats.....	64
6.1	Influence du type de liant et du type de mûrissement sur la résistance à l'écaillage mesuré en laboratoire	64
6.1.1	Liant A	65
6.1.2	Liant B.....	67
6.1.3	Liant C.....	69
6.1.4	Liant D	71
6.1.5	Analyse globale de l'influence du type de cure sur la résistance à l'écaillage des liants testés	72
6.2	Influence du type de superplastifiant sur la résistance à l'écaillage mesurée en laboratoire.....	75
6.3	Influence du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage en laboratoire.....	77
6.4	Influence d'un gros granulats marginal sur la résistance à l'écaillage au laboratoire ...	79
CHAPITRE 7	Conclusions.....	87
ANNEXE A	A-1
ANNEXE B	B-1

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 Représentation schématique du modèle de pression osmotique [7].....	5
Figure 2-2 Profil de température dans un béton recouvert de glace suite à l'application de sel de NaCl [9]	6
Figure 2-3 Profil de température dans un béton recouvert de glace suite à l'application de sel de NaCl [10]	8
Figure 2-4 Trois cas possibles lors du « glue-spall scaling » la fissure peut (a) arrêté dans la glace, (b) bifurquer le long de l'interface glace béton ou (c) pénétrer dans la surface du béton [11]	9
Figure 2-5 Influence de la fumée de silice et de la cendre volante sur la masse de débris de béton peu de temps après la coulée (14, 17 ou 21 jours) [17].....	14
Figure 2-6 Influence de la fumée de silice et de la cendre volante sur la masse de débris de béton 90 jours après la coulée [17]	15
Figure 2-7 Débris recueillis après l'essai d'écaillage et surface de l'échantillon (a) jeune âge (b) 90 jours [17].....	15
Figure 2-8 Influence du type de liant et du volume d'air sur la route visuelle de l'écaillage de bétons avec et sans cendre volante [18].....	17
Figure 2-9 Influence du type de liant et du volume d'air sur le changement de masse en fonction du nombre de cycles de gel-dégel, pour des bétons avec et sans cendres volantes [18]	17
Figure 2-10 Effet de la technique de finition et du pourcentage de remplacement de ciment par du laitier de haut fourneau sur l'écaillage [19]	19
Figure 2-11 Effets du type de liant et de la méthode de cure utilisée sur la masse de débris d'échantillons soumis au test d'écaillage [20]	20
Figure 2-12 Logique du modèle proposé [22].....	21
Figure 4-1 Appareil micro-Deval.....	33
Figure 4-2 Échantillons gel-dégel non confiné	34
Figure 4-3 Granulométrie au cours du projet des gros granulats combinés.....	36
Figure 4-4 Présence de feuillets en surface due à un « pop-out ».....	39
Figure 4-5 Fracture visible dans le granulats.....	40
Figure 4-6 Cône de pâte détachée et fracture visible à la surface du granulats.....	40
Figure 4-7 Taille minimale d'éclatement de 5 mm.....	41
Figure 4-8 Acétate appliquée sur la surface de la plaque à analyser.....	42
Figure 4-9 Traçage du contour des granulats ayant subi un éclatement (« pop-out ») avec un marqueur à pointe fine	42
Figure 4-10 Remplissage des contours avec un marqueur de même couleur	43
Figure 4-11 Acétate prête à être numérisée.....	44
Figure 4-12 Acétate numérisée pour le traitement d'image.....	44
Figure 4-13 Vue du logiciel <i>ImageJ</i> lors du traitement d'une image	45
Figure 4-14 Plaque d'écaillage une fois l'agent de mûrissement appliqué	47
Figure 5-1 Résistance à la compression des bétons de la phase 1.....	55
Figure 5-2 Résistance à la compression des bétons de la phase 2.....	58
Figure 5-3 Résistance à la compression des bétons de la phase 3.....	60
Figure 5-4 Résistance à la compression des bétons de la phase 4.....	62

Figure 6-1 Influence du type de cure sur la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des éprouvettes fabriquées avec le liant A	67
Figure 6-2 Influence du type de cure sur la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des éprouvettes fabriquées avec le liant B	69
Figure 6-3 Influence du type de cure sur la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des éprouvettes fabriquées avec le liant C	71
Figure 6-4 Influence du type de cure sur la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des éprouvettes fabriquées avec le liant D	72
Figure 6-5 Influence du type de cure sur la résistance à l'écaillage des liants A, B, C et D.....	75
Figure 6-6 Influence du type de superplastifiant sur la résistance à l'écaillage des bétons fabriqués avec le liant C	77
Figure 6-7 Influence du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage de bétons fabriqués avec le liant C	79
Figure 6-8 Influence d'un gros granulat marginal et du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage du béton fabriqué avec le liant C	84
Figure 6-9 Influence du gros granulat marginal sur la masse de débris en fonction de trois types de comparaisons par rapport au granulat de référence	85
Figure 6-10 Comparaisons des surfaces de granulats éclatés lors de l'écaillage pour les deux granulats	85
Figure 6-11 Comparaisons de la quantité de granulats éclatés par plaque d'écaillage pour les deux granulats.....	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Résumé des projets de normes CSA, ASTM et BNQ après révision	10
Tableau 2-2 Influence de l'âge, de la quantité de liant et du rapport E/L sur l'écaillage après 50 cycles [21]	20
Tableau 2-3 Résistance à l'écaillage des spécimens exposés à des conditions réelles en fonction du type de liant utilisé et de la méthode de cure employée [23].....	22
Tableau 2-4 Résistance à l'écaillage des spécimens testés en laboratoire en fonction du type de liant utilisé [23]	22
Tableau 2-5 Perte de masse de tous les échantillons après 50 cycles de gel dégel pour trois méthodes de mûrissement [26]	24
Tableau 3-1 Formulation phase 1	27
Tableau 3-2 Types de mûrissement des bétons de la phase 1	28
Tableau 3-3 Formulations phase 2	29
Tableau 3-4 Formulation phase 3	30
Tableau 3-5 Formulation phase 4.....	30
Tableau 4-1 Liants utilisés	31
Tableau 4-2 Granulométrie, module de finesse, densité et absorption du granulat fin utilisé.....	32
Tableau 4-3 Granulométrie, densité et absorption du gros granulat de référence utilisé.....	35
Tableau 4-4 Proportions de gros granulats de référence utilisés au cours du projet.....	35
Tableau 4-5 Résultats du test micro-Deval pour le granulat de référence	36
Tableau 4-6 Résultats du test gel-dégel non confiné pour le granulat de référence.....	37
Tableau 4-7 Granulométrie, densité et absorption du gros granulat de référence.....	37
Tableau 4-8 Résultats du test micro-Deval pour le granulat marginal.....	38
Tableau 4-9 Résultats du test gel-dégel non confiné pour le granulat marginal	38
Tableau 4-10 Formulations des bétons de la phase 1	49
Tableau 4-11 Formulations des bétons de la phase 2	51
Tableau 4-12 Formulations des bétons de la phase 3	52
Tableau 4-13 Formulations des bétons de la phase 4.....	54
Tableau 5-1 Masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des bétons de la phase 1	57
Tableau 5-2 Masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des bétons de la phase 2	59
Tableau 5-3 Masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des bétons de la phase 3	61
Tableau 5-4 Masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des bétons de la phase 4	63
Tableau 6-1 Quantités et pourcentage de surface de « pop out » pour six mélanges.....	84

LEXIQUE

Terme technique	Définition
Éclatement d'un granulat (pop-out)	Destruction d'un granulat au gel-dégel par éclatement.
Facteur d'espacement, \bar{L}	Demie-distance moyenne entre deux bulles d'air adjacentes.

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
α	Surface spécifique des bulles d'air
\bar{L}	Facteur d'espacement des bulles d'air

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
SP	Superplastifiant
SSS	Saturé surface sèche
PNS	Polynaphtalènes sulfonâtes
PCP	Polycarboxylate
SG	Sans géotextile
PC	Produit de cure
BNQ	Bureau de Normalisation du Québec
CSA	Canadian Standard Association
ASTM	American Standard Test Method

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Au Québec, l'écaillage dû à l'utilisation de sels fondants est un type de détérioration très courant, mais dont les mécanismes d'action sont encore mal compris. Plusieurs publications et plusieurs recherches se sont penchées sur cette problématique de la durabilité du béton. Plusieurs chercheurs ont développé, dans les 70 dernières années, des théories qui tentent d'expliquer ce phénomène. Encore aujourd'hui, aucune théorie prise individuellement ne permet d'expliquer entièrement les causes de ce phénomène et le rôle protecteur d'un bon réseau de bulles d'air [1] sur les bétons qui sont dans des conditions à risque.

Tout d'abord, il est important de rappeler que l'écaillage est un type de dégradation du béton qui se caractérise par l'effritement de la surface de celui-ci en flocons de petites dimensions. Plusieurs chercheurs qui se sont penchés sur le sujet pensent qu'il est dû à une multitude de facteurs. Bien que ce phénomène dégrade principalement l'aspect esthétique des surfaces de béton, il peut également, dans certains cas extrêmes, augmenter les risques de corrosion des bétons armés en réduisant l'épaisseur de recouvrement entre la surface de béton et l'armature. L'écaillage est principalement nuisible sur les surfaces des trottoirs et des chaussées puisque celles-ci deviennent alors très inconfortables à la circulation pédestre et automobile.

Afin de quantifier les risques d'écaillage, plusieurs tests ont été développés un peu partout dans le monde. Au Québec, trois tests accélérés sont principalement utilisés soit les tests des normes ASTM, BNQ et CSA. Ces tests ont tous leurs particularités, mais ils ont tous un même objectif à savoir : fournir une réponse rapide quant à la probabilité que le béton formulé subisse de l'écaillage. Or, dans les dernières années, de plus en plus de donneurs d'ouvrage ont commencé à spécifier des bétons fabriqués avec des liants ternaires. Ce type de béton produit parfois des résultats insatisfaisants lors d'essais d'écaillage en laboratoire. Ces résultats ont incité les donneurs d'ouvrage à mieux comprendre la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec des liants ternaires.

Ce projet de recherche se penche donc sur cette problématique. Tout d'abord, une revue de l'état de l'art dans le domaine de l'écaillage dû aux sels fondants des bétons ternaires est présentée. Avec les informations recueillies, un programme expérimental est développé. Ce programme permettra de réaliser des essais en laboratoire afin de valider et de quantifier l'effet de différents paramètres sur l'écaillage de ce type de béton. Les résultats recueillis seront analysés et présentés dans ce mémoire.

L'objectif de ce projet de recherche est donc d'outiller les propriétaires d'ouvrages afin qu'ils puissent mettre en place une méthode d'essais et des critères d'admissibilité à l'écaillage pour des bétons avec liant ternaire. En plus, le programme expérimental de ce projet permettra de répondre à des questions particulières soulevées par les propriétaires d'ouvrages et d'ainsi améliorer leur compréhension du comportement des bétons spécifiés avec ce type de liant. Avec ces nouvelles informations en main, ceux-ci seront donc en mesure de réaliser des choix éclairés qui permettront d'améliorer la durabilité de ses ouvrages.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Modèle d'écaillage

2.1.1 Phénomène à l'origine de l'écaillage

Les phénomènes qui sont à l'origine de l'écaillage sont multiples puisqu'à ce jour aucun modèle pris individuellement ne semble pouvoir expliquer tous les cas d'écaillage et l'effet des différents paramètres du béton. Il semble donc plus plausible que l'écaillage soit dû à une combinaison de mécanismes qui seront décrits dans les sections suivantes. Les facteurs nécessaires à l'apparition d'écaillage sur une surface de béton seraient la présence d'une solution saline et des cycles de gel-dégel [2].

2.1.2 Modèle de pression hydraulique

Ce modèle proposé initialement par Powers en 1949 [3] fait état d'une pression hydraulique qui apparaît dans la pâte de ciment lorsque l'eau présente dans le béton tant à geler. Si la pâte de ciment est saturée, l'eau gèle, prend de l'expansion et gagne 9 % de volume. Puisque la pâte est saturée, l'eau est donc forcée de se déplacer vers les seuls espaces disponibles soit les bulles d'air présentes dans la pâte. L'eau qui tente de rejoindre les bulles d'air migre donc à travers la pâte. Powers a donc utilisé des notions de la loi d'écoulement dans les milieux poreux de Darcy afin de quantifier la pression engendrée par ce mouvement. Il a ainsi déduit une formule permettant, selon lui, de calculer la longueur maximale du trajet (L_{max}) vers les bulles d'air dans un béton afin d'éviter que la pression n'excède la résistance en traction de celui-ci. Cette formule fait interagir les éléments suivants [4] :

- La vitesse de refroidissement R ;
- Le coefficient de perméabilité de la pâte de ciment K ;
- La quantité d'eau gelable lorsque la température s'abaisse de 1°C U ;
- La résistance en traction de la pâte σ_t .

$$\frac{KT}{UR} \times (\text{constante})$$

Puisque la pâte de ciment est peu résistante en traction, lorsque la distance entre les bulles d'air est trop grande, c'est-à-dire lorsque la distance à parcourir L est supérieure au L_{max} , la pression engendrée par l'écoulement de l'eau est telle qu'elle entraîne une rupture en traction de la celle-ci. La théorie de Powers [3] n'explique malheureusement pas complètement le phénomène. Elle s'appuie principalement sur le fait que l'eau est expulsée en dehors des pores capillaires alors que ce n'est pas ce qui est observé expérimentalement. On constate plutôt une migration de l'eau des pores des C-S-H vers les capillaires [4]. La théorie des pressions hydrauliques fournit tout de même des pistes de solutions intéressantes afin de caractériser le comportement au gel dégel du béton dont l'importance du facteur d'espacement \bar{L} . Il est important de noter que la concentration en ion de cette eau a une influence sur la température de fusion de celle-ci et ainsi une influence sur la pression engendrée. Une eau avec une forte concentration en ion gèlera à une température inférieure à une eau à très faible concentration. Plus la concentration en ion est faible, plus les effets de la pression hydraulique devraient être grands. Or on constate que la concentration en ion la plus critique serait d'environ 3% alors qu'une eau pure gèle à une température supérieure.

2.1.3 Modèle de pression osmotique

Powers et Helmuth ont poursuivi leurs recherches sur le comportement au gel dégel du béton dans les années 50 [5]. Ils ont alors découvert que l'eau avait tendance à se déplacer vers les pores capillaires lors du gel. Ce déplacement d'eau cause du retrait dans la pâte avec air entraîné qui peut alors causer de la fissuration dans celle-ci. Ils ont également découvert que l'eau ne gèle pas à 0 °C dans les capillaires et que plus ceux-ci sont fins, plus la température doit être basse avant que l'eau puisse former des cristaux et geler.

Powers et Helmuth [5] proposent que lorsque l'eau gèle dans les pores il se crée une différence d'énergie. En effet, l'énergie potentielle de l'eau des pores de gel est supérieure à celle de l'eau gelée, celle-ci est donc forcée de se déplacer vers les pores capillaires. Une fois dans les pores capillaires, cette eau aura tendance à geler à son tour. Cela occasionne donc un déplacement d'eau de la pâte vers les pores. L'eau supplémentaire qui gèle dans les pores génère des pressions sur la surface du pore et ces pressions peuvent causer des dommages permanents à la pâte.

En 1975, Powers [6] propose une version modifiée qui prend en compte que l'eau contenue dans les pores n'est pas pure et contient des alcalis tels que le Na_2O et le K_2O . Sa théorie est donc modifiée afin de prendre en compte l'influence de la concentration en ions de l'eau sur son point de congélation. Dans cette version modifiée, l'eau gèle dans les plus gros pores puisque la tension de surface est moindre et favorise donc une température de congélation plus élevée. Il est également important de noter que l'eau dans les pores ne gèle pas d'un coup. Puisque l'eau gèle progressivement, la concentration de l'eau liquide augmente jusqu'à atteindre un équilibre entre la température de fusion et la température dans le pore. Cette théorie est représentée sur la Figure 2-1.

Tel qu'illustré sur la Figure 2-1, puisque la concentration dans les gros pores augmente et que la concentration dans les pores plus petits est plus faible, l'eau des petits pores est donc attirée vers les gros pores. Ce mouvement engendre des contraintes dans la pâte qui peuvent être dommageables. De plus, cette diminution de la concentration de l'eau dans les gros pores favorise la formation d'un plus grand volume de glace. Ce plus grand volume de glace peut être dommageable pour la pâte.

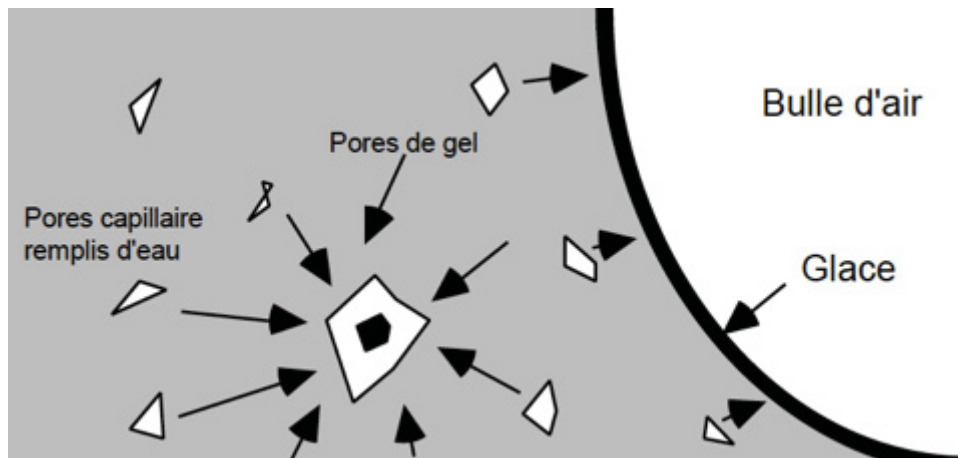


Figure 2-1 Représentation schématique du modèle de pression osmotique [7]

Ce modèle est particulièrement intéressant puisqu'il permet d'expliquer le phénomène de retrait dans la pâte lors des cycles de gel-dégel déjà observé lors d'expérimentations [5]. Il permet également d'expliquer l'influence de la présence de sel de déglaceage lors de l'écaillage. Par contre, selon Pigeon et Pleau [4], le modèle des pressions osmotiques ne serait

pas complet. Selon eux, il n'explique pas que la vitesse de refroidissement a un effet sur l'écaillage, mais laisse plutôt présager que c'est une durée de cycle plus longue qui est dommageable. Ils critiquent également l'explication fournie sur l'aide apportée par le réseau de bulle d'air et considèrent que l'explication fournie serait insuffisante.

2.1.4 Modèle du choc thermique

Une autre hypothèse qui pourrait expliquer l'écaillage en présence de sel de déglçage est le modèle du choc thermique. Des recherches menées par Rösli dans les années 70 [8], [9] ont fait ressortir des informations intéressantes sur l'application des sels de déglçage. En effet, ces études ont montré avec des essais sur le terrain que l'application de sel de déglçage est hautement endothermique et entraîne des différences de température radicales sur la peau du béton. En surface, le béton donne sa chaleur à la réaction, ainsi il refroidit rapidement alors que le film d'eau à sa surface se réchauffe. Ce gradient de température occasionne des contraintes internes qui s'appliquent sur la peau du béton. Ces contraintes sont à l'origine de la microfissuration de surface [10] et c'est le gonflement de l'eau présente dans ces fissures qui créeraient l'écaillage. Ce phénomène est représenté sur la Figure 2-2.

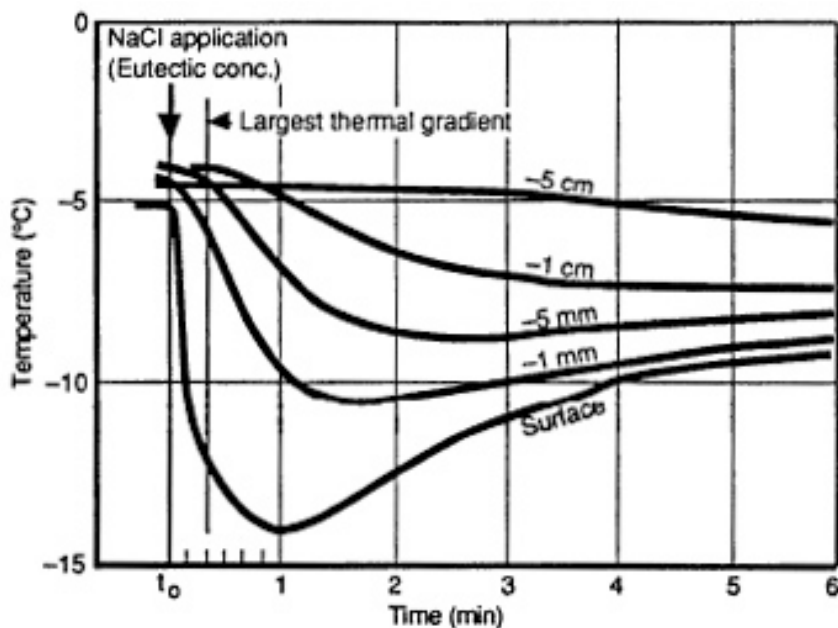


Figure 2-2 Profil de température dans un béton recouvert de glace suite à l'application de sel de NaCl [10]

Le point faible de ce modèle est, qu'encore une fois, il n'explique pas l'influence positive d'un bon réseau de bulle d'air et d'un bon \bar{L} sur la résistance à l'écaillage du béton. Il peut par contre venir compléter un autre modèle pour expliquer l'importance de la résistance en traction de la pâte lors de l'écaillage.

2.1.5 Modèle de gradient de concentration ionique en surface

En 1980 Harnik, Meier et Rösli [9] ont également proposé un modèle qui prend en compte le gradient de concentration en ion à la surface du béton. Ces chercheurs ont démontré que la concentration en ion était variable sur les premiers centimètres de la peau du béton. Cette variation est illustrée sur la Figure 2-3. Ainsi, les premiers centimètres du béton se divisent en trois segments. Pour les premiers mm d'épaisseur, la concentration est relativement faible puisque cette surface est souvent lessivée par l'eau de pluie ou encore la fonte de la neige. Ensuite, la concentration augmente avec l'épaisseur jusqu'à atteindre un plateau qui représente la concentration maximale de l'ion dans la pâte de ciment pour ensuite décroître jusqu'à une concentration pratiquement nulle. Ce gradient de concentration observable sur la Figure 2-3 crée donc un plan sous la surface du béton dont la concentration en ion est plus élevée que les couches moyennes. Ce gradient amène donc un comportement différent en période de gel. En effet, les zones où la concentration en ion est la plus faible en surfaces et en profondeur ont tendance à geler plus rapidement créant ainsi des tensions dues à l'expansion de ces deux interfaces. Lorsque la couche moyenne gèle, l'eau ne peut être expulsée puisque les deux couches voisines sont déjà gelées et que leurs perméabilités sont faibles. Ces pressions entraînent des contraintes qui peuvent causer de la fissuration dans la pâte et donc l'écaillage du béton. Ce modèle est intéressant et contribue à expliquer pourquoi l'écaillage se produit sur une fine couche en surface. Par contre, il ne permet pas d'expliquer l'effet du réseau de bulle d'air sur la diminution de l'écaillage. Il est important de noter que cette théorie ne permet pas d'expliquer les cas d'écaillage lorsque la surface est en contact constant avec une solution saline comme lors des tests d'écaillage accéléré en laboratoire.

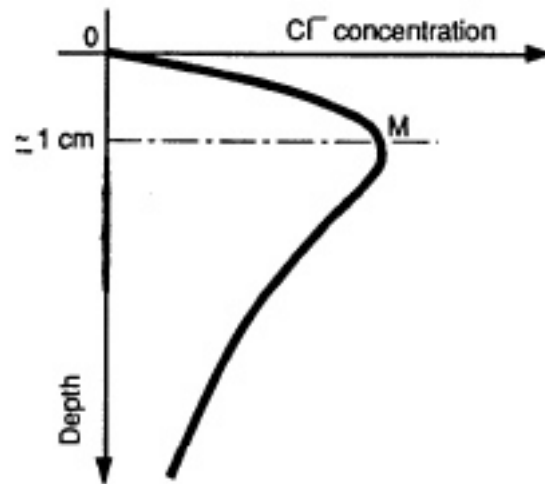


Figure 2-3 Profil de température dans un béton recouvert de glace suite à l'application de sel de NaCl [9]

2.1.6 Modèle « glue-spall scaling »

En 2006 Valenza et Scherer [11] ont proposé une théorie qu'ils ont nommée « Glue-spall scaling ». Cette théorie qui est schématisée sur la Figure 2-4 se base principalement sur les propriétés thermodynamiques de la glace légèrement saturée en ion.

Cette nouvelle approche se résume comme suit. Lorsque l'eau gèle à la surface du béton, il se forme une adhérence entre la glace et la peau du béton. Quand la température diminue, des contraintes sont induites dû à la grande différence qui existe entre le coefficient de dilatation thermique du béton et de la glace. Les contraintes de traction générées se propagent dans le composite glace pâte de ciment et si la qualité de la peau du béton est faible, la fissuration se produit dans la glace et dans la peau du béton (voir cas (c) de la Figure 2-4) [11]. Ces fissures affaiblissent la peau du béton et causent des dommages superficiels à celle-ci sous forme d'écailles de béton.

Encore selon Valenza et Schere, l'avantage de leur théorie par rapport aux autres théories proposées est qu'elle permet d'expliquer plusieurs phénomènes qui jusque-là ne pouvaient pas être expliqués complètement [11]. Par exemple, ils expliquent l'influence d'un bon réseau de bulle d'air. Ils avancent en se basant sur les travaux d'autres chercheurs (voir [11] pour références) qu'un bon réseau de bulle d'air réduit le ressuage et diminue ainsi la porosité de la surface. Puisque la peau du béton est moins poreuse, il y a moins de chance que le cas (c) sur

la Figure 2-4 survienne puisque la peau du béton est plus résistante et que la glace adhère moins à la peau [11] comme celle-ci est moins poreuse. Les auteurs corrélaient leur modèle avec huit facteurs influençant l'écaillage généralement reconnu dans la littérature. Ces huit facteurs couvrent entre autres l'influence de la concentration de la solution saline en contact avec le béton, la température maximale à laquelle l'écaillage survient et le mécanisme progressif de l'écaillage [11]. Il ne faut pas non plus tirer de conclusions hâtives en ce qui a trait à ce modèle. Il est encore récent et certains chercheurs critiquent ses conclusions qui peuvent sembler manquer de nuance.

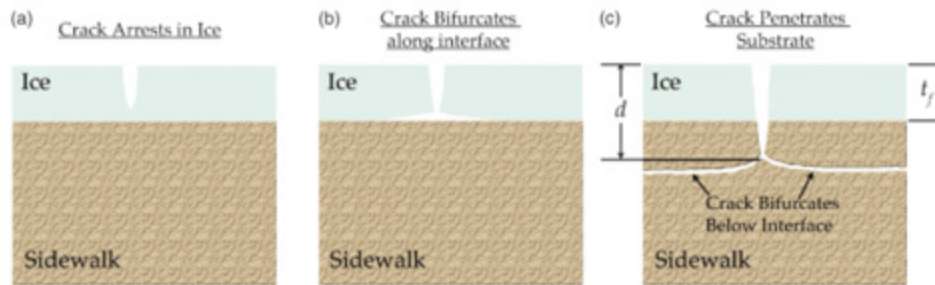


Figure 2-4 Trois cas possibles lors du « glue-spall scaling » la fissure peut (a) arrêter dans la glace, (b) bifurquer le long de l'interface glace béton ou (c) pénétrer dans la surface du béton [11]

2.2 Revue des tests d'écaillage selon les normes CSA, ASTM et BNQ

Le Tableau 2-1 est un rappel des points importants des nouvelles versions de chaque norme principalement utilisées au Québec. Il permet de mettre en évidence les changements qui ont été apportés à ceux-ci au cours des dernières années.

À l'aide de ce tableau, il est possible de constater que la norme CSA A23.2-22C [12] et la norme BNQ 2621-905 [13] sont semblables. En effet, elles se distinguent principalement par la durée de cure proposée. La norme BNQ prévoit une cure humide de 14 jours, peu importe le mélange utilisé. La norme CSA quant à elle prévoit une autre période de cure jusqu'à l'obtention de la résistance en compression (f'_c) désirée.

Le projet de norme ASTM C672 WK9367 [14] diffère principalement des deux autres normes puisqu'elle exige une isolation latérale complète afin que l'échantillon ne gèle que dans un seul sens. Cela a pour objectif de s'approcher davantage des conditions réelles puisque l'eau gèlera de la surface exposée vers le bas de l'échantillon et non pas des surfaces vers le centre.

Tableau 2-1 Résumé des projets de normes CSA, ASTM et BNQ après révision

Critères	Procédures normalisées		
	CSA A23.2-22C	ASTM C672 WK9367	BNQ 2621-905
Taille d'échantillons	0,045 m ² x 75 mm	0,045 m ² x 75 mm	0,050 m ² x 75 mm
Nombre d'échantillons	2	2	2
Géotextile absorbant	Oui	Non	Oui
Finition de l'échantillon	Régaler avec une règle en bois de 40 x 85 mm en effectuant une passe en longueur et une passe en largeur (la section de 40 mm à plat)	Régaler avec une règle en bois de 40 mm de large en effectuant deux passes en longueur et deux passes en largeur	Régaler avec une règle en bois de 40 x 85 mm en évitant la finition excessive
Démoulage	22 ± 2h	24 ± 4h	24 ± 4h
Rebords de l'échantillon lors du test	Dépasse la hauteur de l'échantillon de 20 mm (polystyrène extrudé et silicone sont efficaces)	125 x 25 mm sur toute la hauteur de l'échantillon tout en dépassant l'échantillon de 25 mm. Polystyrène avec ports fermés coller avec colle silicone conseillé	Prévoir un cadre d'étanchéité permettant la mise en place de 5 mm ± 2 mm de solution saline
Cure	Jusqu'à f ^c désirée ou 14 jours de cure humide suivie de 14 jours à 23 ± 2°C à 45 à 55% d'humidité	Cure humide de 14 jours pour 100% ciment ou 28 jours si on utilise des SCM + 14 jours à l'air libre 23°C ± 2°C à 45 à 55% d'humidité	Cure humide de 14 jours + 14 jours de séchage à 15 à 20°C et 50% ± 20% d'humidité
Isolation latérale de l'échantillon	Non	Oui, afin d'assurer la congélation dans une seule direction	Non
Nombre de cycles	50 cycles (si manuel) 56 cycles (si automatique)	50	56
Prise de mesure	5, 10, 15, 25, 50 (si manuel) 7, 14, 21, 35, 56 (si automatique)	Tous les 5 cycles jusqu'à 50 cycles	7, 21, 35 et 56 cycles

2.3 Influences de certaines caractéristiques du béton sur sa résistance à l'écaillage

2.3.1 Rapport E/C ou E/L

De façon générale, réduire le rapport eau/ciment (E/C) est une des façons les plus efficaces d'augmenter la résistance à l'écaillage [15], [16]. Cette observation peut s'expliquer par le fait que la diminution du rapport E/C réduit la porosité de la pâte à l'intérieur du béton et en surface. Cette diminution de la porosité de la pâte améliore généralement son imperméabilité ainsi que sa résistance. Dans un milieu non saturé, la quantité d'eau présente dans le béton est donc réduite, ce qui diminue les chances que la pression interne causée par le gel détruise la pâte. De plus, pour un même type de mélange réalisé avec les mêmes matériaux, mais avec un rapport E/C plus faible, on observe une augmentation de la résistance de la pâte. Cette augmentation de résistance participe à réduire les risques que celle-ci ne cède sous les pressions exercées par le gel du béton.

2.3.2 L'entraînement d'air

La présence d'air dans le béton de façon générale n'améliore pas forcément la résistance à l'écaillage du béton. Le facteur le plus influant sur la résistance à l'écaillage du béton est le \bar{L} . En effet, un réseau de bulles d'air de petit diamètre en nombre suffisant a un effet beaucoup plus bénéfique sur la durabilité du béton [2] que la même quantité d'air présente sous forme de grosses bulles. Ce gain en durabilité est attribuable à la distance que l'eau parcourt entre deux vides qui est beaucoup plus faible lorsque les bulles ont des diamètres plus petits pour un même pourcentage d'air donné [17]. Le \bar{L} est donc un facteur déterminant de la durabilité des bétons et on considère qu'un facteur inférieur à 230 μm pour des bétons courants ($E/C > 0,36$) est nécessaire afin d'assurer une bonne durabilité à l'écaillage selon la norme CSA A23.1 (2014).

2.3.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression ne semble pas corrélée directement avec la durabilité à l'écaillage du béton. Par contre, les facteurs influençant la résistance à la compression peuvent avoir une influence directe sur la durabilité de celui-ci. Par exemple, certaines recherches ont

démonstré que des bétons haute performance (BHP), avec un rapport E/L inférieur à 0,25, peuvent résister à l'écaillage sans agent entraîneur d'air dans le mélange [7]. En sachant qu'un rapport E/L très faible assure une bonne durabilité, il est possible d'en déduire que la porosité, la perméabilité et la résistance en traction du béton ont une influence sur l'écaillage.

2.4 Influence de l'utilisation de fumée de silice sur l'écaillage du béton

Depuis quelques années, la présence de bétons binaires avec fumée de silice augmente sur les chantiers du Québec. Ce type de béton présente plusieurs avantages autant au niveau des résistances que de la perméabilité, mais il présente également quelques particularités. Le comportement de ces bétons à l'écaillage diffère des bétons avec 100 % ciment Portland et c'est pourquoi il est intéressant de s'y attarder.

Très peu de recherches récentes ont été menées spécifiquement sur les performances à l'écaillage des bétons avec fumée de silice. De façon générale, les bétons binaires avec fumée de silice ayant un rapport E/L inférieur à 0,40 et un taux de remplacement du ciment portland inférieur à 10 % [4] permettent d'obtenir des résistances à l'écaillage satisfaisantes. Par contre, il est important de s'assurer d'être protégé par un réseau de bulles d'air entraînées [18].

Lorsque les bétons binaires avec fumée de silice sont utilisés avec un bon réseau de bulles d'air entraîné, ils produisent généralement de meilleures résistances à l'écaillage que les bétons ternaires autant en laboratoire qu'au chantier [19].

2.5 Influence de l'utilisation de cendres volantes sur l'écaillage du béton

2.5.1 Influence de la période de cure sur l'écaillage de béton ternaire avec cendre volante

L'effet du type de cure et la durée initiale de la cure ont également un effet sur la durabilité à l'écaillage des bétons ternaires incluant du ciment Portland, de la fumée de silice et de la cendre volante [20]. Tel qu'illustré par les résultats présentés à la Figure 2-5, les bétons dont le

taux de remplacement de cendre volante est de 30 %, obtiennent des résultats de masse de débris semblables ou supérieur lorsque les tests sont réalisés au jeune âge. Après 90 jours, les moins bonnes résistances à l'écaillage sont généralement observées sur le mélange avec 30 % de cendre volante. Les résultats des tests réalisés à 90 jours sont présentés sur la Figure 2-6.

Les résultats des essais réalisés au jeune âge permettent également de constater que le type et la qualité de la cure influencent les performances de l'échantillon lorsque celui-ci est exposé rapidement à des cycles de gel dégel et à des sels de déglacage. L'influence de la durée de cure humide, 3 ou 7 jours, a un impact sur la quantité de matériaux recueillis lorsqu'ils sont testés à jeune âge [20]. Cet impact diminue considérablement lorsque les échantillons sont testés à 90 jours. C'est donc dire qu'un élément en béton avec un fort taux de remplacement cimentaire coulé peu de temps avant les premiers gels risque d'être beaucoup plus sensible au type de cure utilisé qu'un élément coulé au début de l'été.

Le type de rupture de la surface semble également différer entre les tests réalisés au jeune âge et ceux réalisés après 90 jours. Tel qu'illustré sur la Figure 2-7, au jeune âge la rupture semble survenir sur les premiers mm de la pâte tandis qu'après 90 jours la rupture se manifeste sous la forme d'une écaille de plus grande taille ou d'un « pop out ».

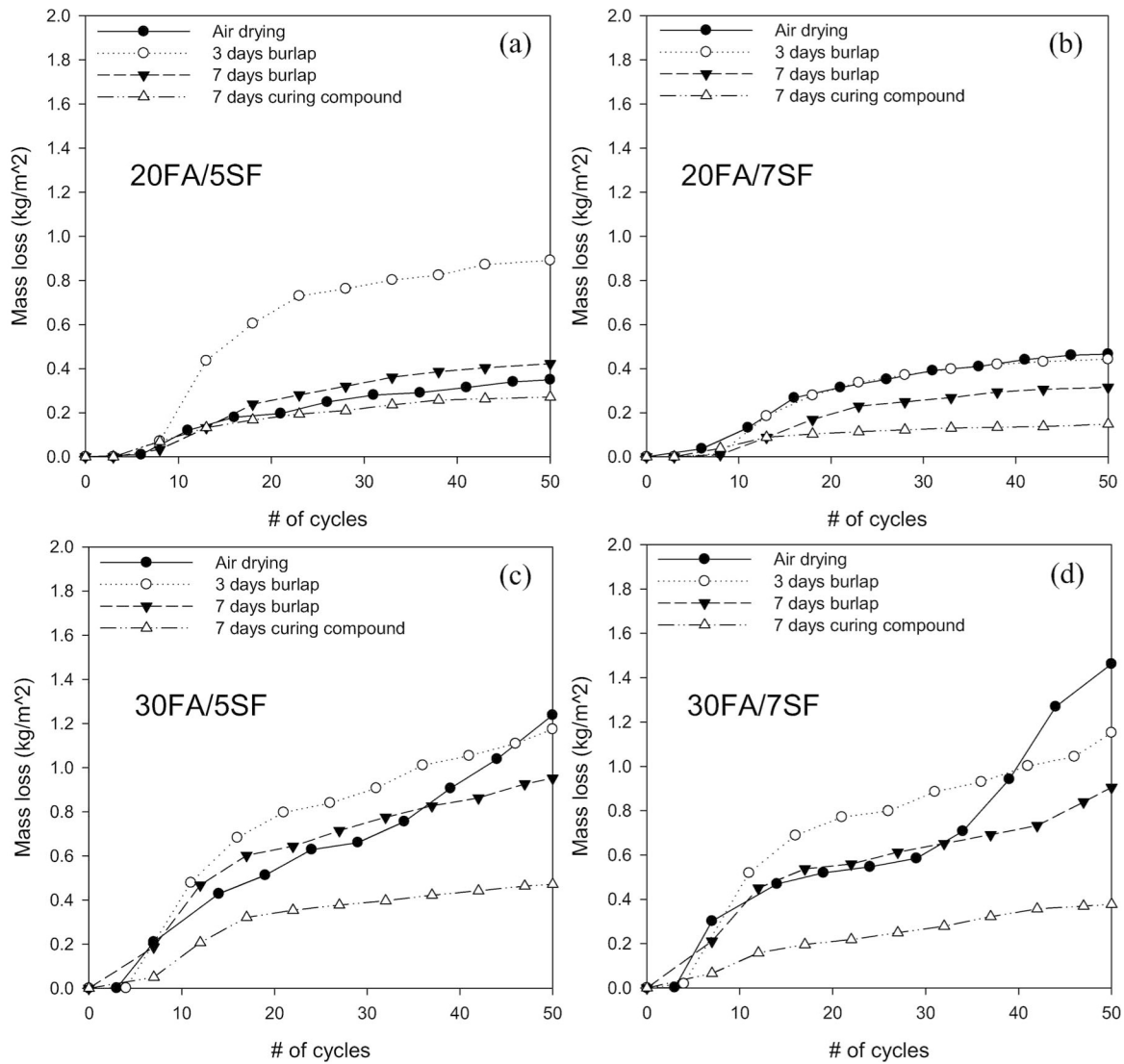


Figure 2-5 Influence de la fumée de silice et de la cendre volante sur la masse de débris de béton peu de temps après la coulée (14, 17 ou 21 jours) [20]

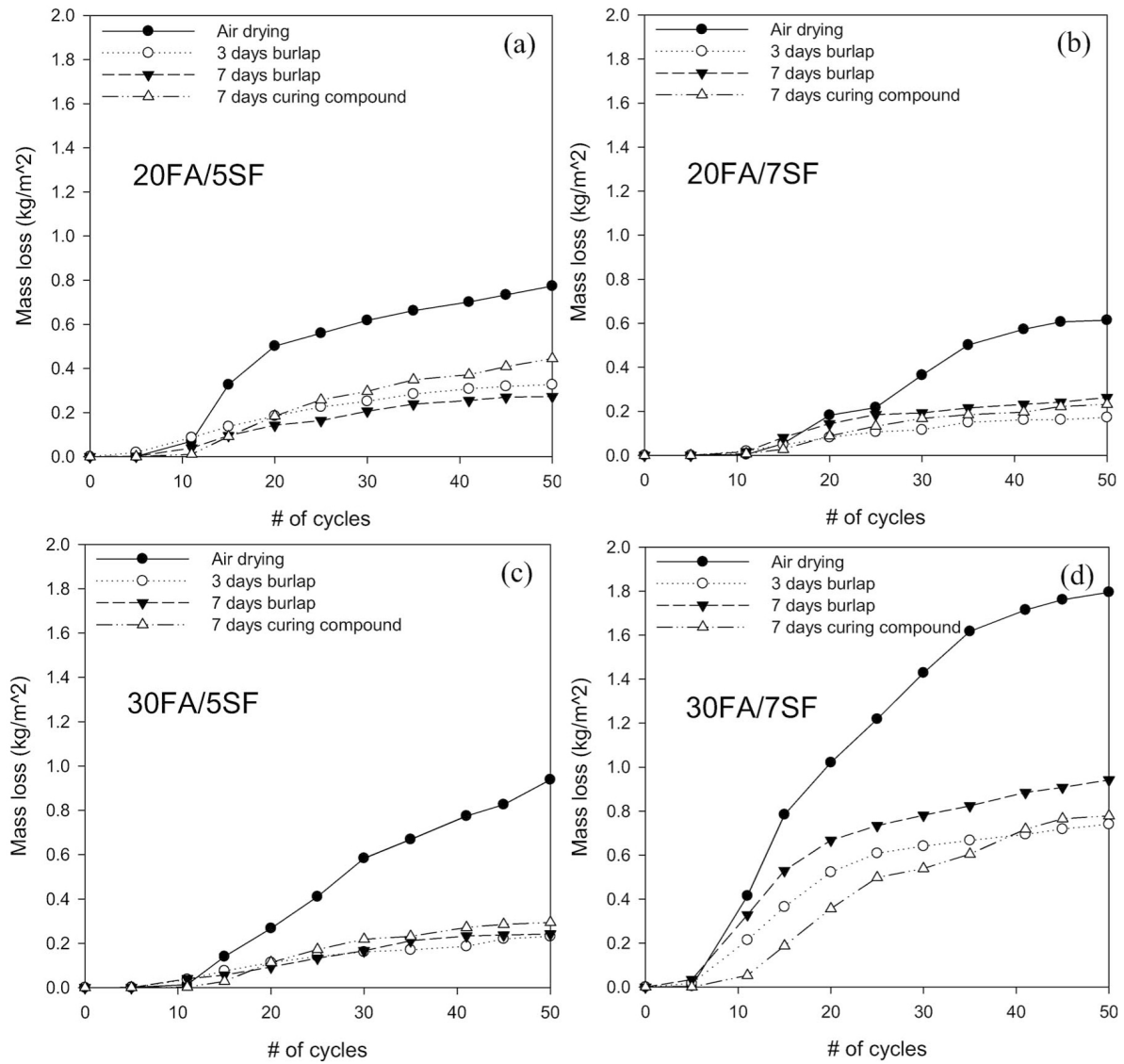


Figure 2-6 Influence de la fumée de silice et de la cendre volante sur la masse de débris de béton 90 jours après la coulée [20]

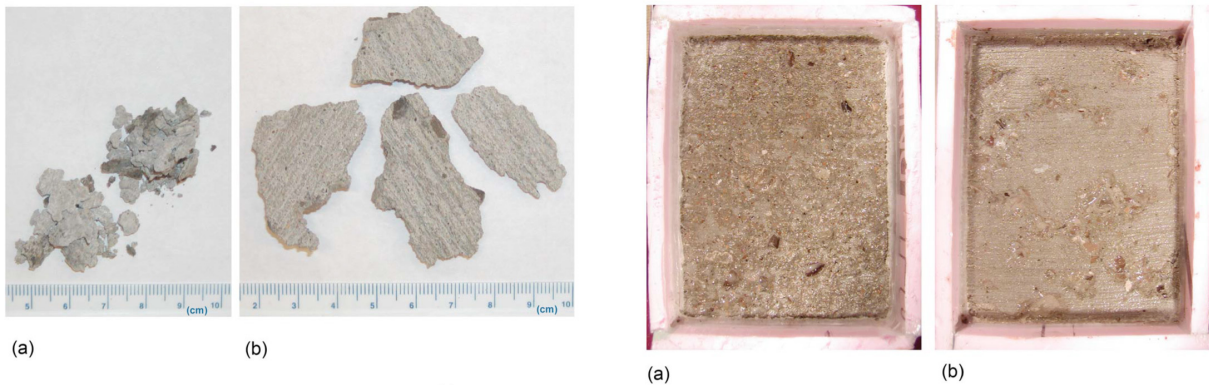


Figure 2-7 Débris recueilli après l'essai d'écaillage et surface de l'échantillon (a) jeune âge (b) 90 jours [20]

2.5.2 Hypothèses pour expliquer la faible résistance à l'écaillage des bétons avec cendres volantes

Des recherches menées à l'Université de l'Oklahoma, ont permis de mettre en évidence quelques phénomènes qui peuvent expliquer en partie la faible résistance à l'écaillage des bétons avec un fort taux de remplacement par de la cendre volante. Tout d'abord, tel qu'illustré sur la Figure 2-8, le béton avec 70 % de cendre volante est le béton qui performe le moins bien à l'écaillage avec le béton avec 100 % de ciment Portland sans air entraîné [21]. On constate également une différence de qualité de surface après 20 cycles de gel-dégel entre les deux types de cendres volantes utilisées pour les bétons avec 50% de remplacement [21]. On constate sur la Figure 2-8 que la cendre volante 1 génère plus de dommage à l'écaillage comparativement à la cendre 2.

De plus, il est intéressant de constater qu'avec la même pâte, lorsqu'on enlève les gros granulats, la résistance à l'écaillage tend à augmenter. L'auteur propose une piste de solution pour justifier ce phénomène. Il propose que l'absence des gros granulats a pour effet de diminuer la taille de la zone d'interface pâte granulat et améliore ainsi la résistance de la peau de l'échantillon [21]. Un béton avec une interface pâte-granulat plus importante et avec des granulats près de sa surface pourrait favoriser un écaillage plus sévère.

Afin de suivre l'absorption de la solution saline sur les échantillons, ceux-ci ont été pesés après chaque lecture. Comme le montre la Figure 2-9, l'échantillon avec 70 % de cendres volantes est celui qui a absorbé le plus de solutions au cours des cinq premiers cycles. Ce phénomène pourrait s'expliquer par une plus grande porosité de la surface de ce béton [21]. Cette augmentation de porosité peut être dû à une moins bonne hydratation de la cendre volante en surface ce qui a pour effet d'augmenter la porosité et donc l'absorption. Étant donné que la surface est plus saturée que celles des autres bétons, il est possible que ce phénomène ait contribué à augmenter les pressions hydrauliques lors du gel et contribuer grandement à diminuer la résistance à l'écaillage.

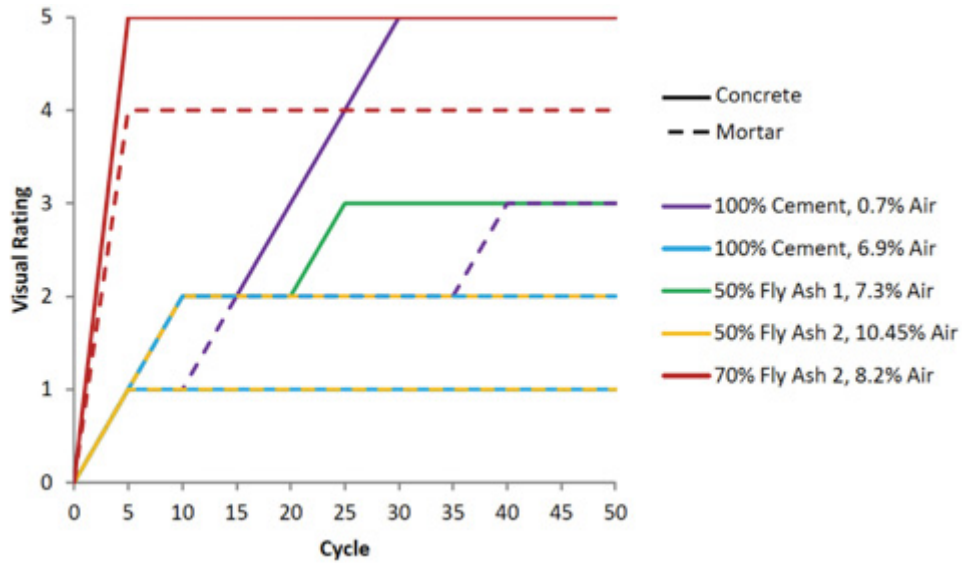


Figure 2-8 Influence du type de liant et du volume d'air sur la route visuelle de l'écaillage de bétons avec et sans cendre volante [21]

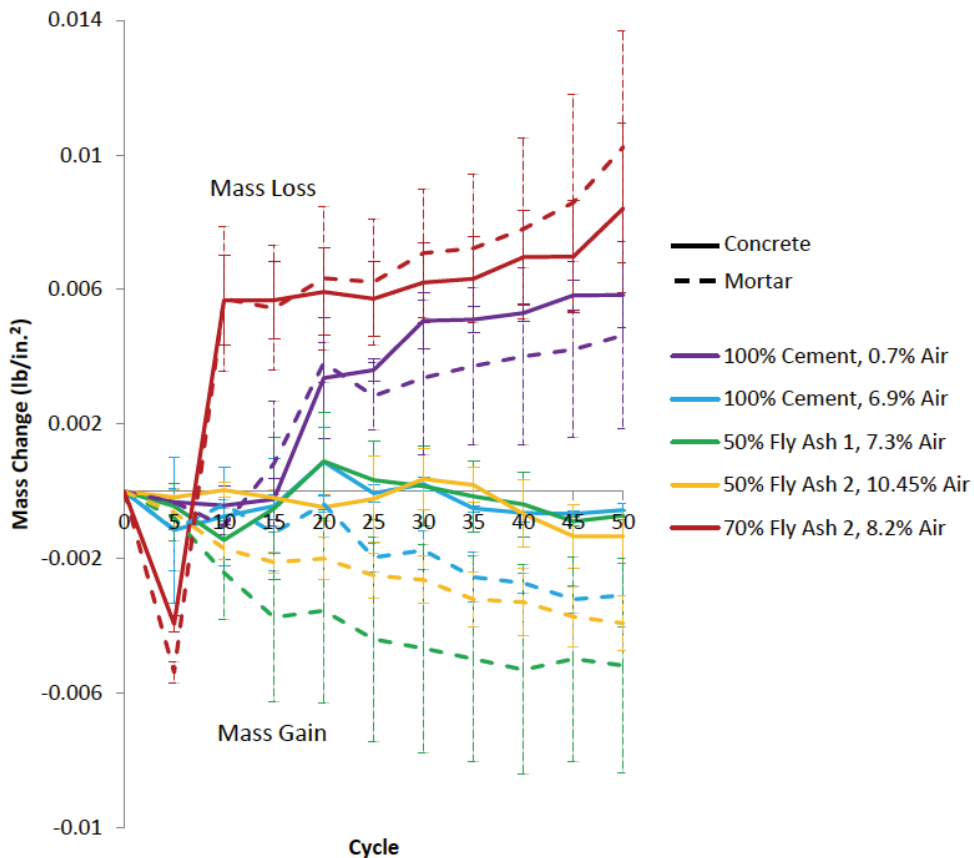


Figure 2-9 Influence du type de liant et du volume d'air sur le changement de masse en fonction du nombre de cycles de gel-dégel, pour des bétons avec et sans cendres volantes [21]

2.6 Influence de l'ajout de laitier sur la durabilité à l'écaillage du béton

2.6.1 Influence de la période de cure sur l'écaillage de béton ternaire avec laitier de haut fourneau

En 2007 Panesar a regroupé les travaux de sept chercheurs portant sur la durabilité des bétons contenant du laitier [22]. Ces recherches permettent de mettre en relation l'effet de la technique de mise en place et du taux de remplacement de ciment Portland par du laitier sur la résistance à l'écaillage. Les résultats de la Figure 2-10 montrent qu'un taux de remplacement supérieur à 50 % provoque des pertes de masses de débris qui dépassent le 1 kg/m^2 . Un taux de remplacement inférieur à 25% semble être optimal, peu importe le type de finition utilisé. L'effet du type de finition sur la masse de débris est important. Les surfaces finies à la règle présentent des masses de débris dépassant le 1 kg/m^2 à partir d'un taux de remplacement de 25% comparativement aux résultats obtenus sur surface coffrée qui dépasse le 1 kg/m^2 de débris à partir d'un taux de remplacement de 45%. Cette différence peut être largement attribuable à la qualité de finition qui peut affecter la porosité de la pâte en surface. Une surface coffrée est généralement plus lisse, mieux consolidée et donc a moins de chance d'être poreuse.

Afrani et Rogers (1994) ont mesuré l'effet sur la masse de débris causé par l'écaillage de six combinaisons de ciments et cinq méthodes de cure différentes. Les résultats recueillis pour ces tests ont été réalisés avec les normes ASTM C672 et MTO LS-412 de l'époque (1994). Ces deux normes prescrivent des cures humides de 14 jours suivies de 14 jours de séchage à l'air ambiant. Des cinq mélanges testés, il y a deux bétons binaires avec 25 et 50 % respectivement de laitier, un mélange ternaire avec 25 % de laitier et 4 % de fumée de silice, finalement les deux derniers mélanges sont composés à 100 % de ciment portland à faible teneur en alcalis ou à haute teneur en alcalis. Sur la Figure 2-11 on constate que pour les bétons avec 0 % et 25 % de laitier, la méthode et la durée de la cure influencent peu la résistance à l'écaillage [23]. Par contre, toutes les techniques de finition utilisées sur les bétons contenant 50 % de remplacement cimentaire par du laitier ne permettent pas d'obtenir les performances à l'écaillage désirées [23]. Les auteurs suggèrent que ce phénomène peut être expliqué par la

durée insuffisante de la cure [23]. Les suggestions de Afrani et Rogers tendent à se confirmer dans plusieurs recherches récentes. En effet, tel qu'il est possible de l'observer dans les résultats présentés dans le Tableau 2-2, la résistance à l'écaillage des bétons contenant plus de 40 % de remplacement cimentaire par du laitier tend à augmenter avec le temps pour un même rapport E/L [24]. En comparant les résultats des trois études, on constate qu'il est possible d'obtenir de bons résultats à l'écaillage en laboratoire avec une cure en chambre humide de 14 jours lorsque le liant utilisé présente 25 % et moins de laitier [22]–[24].

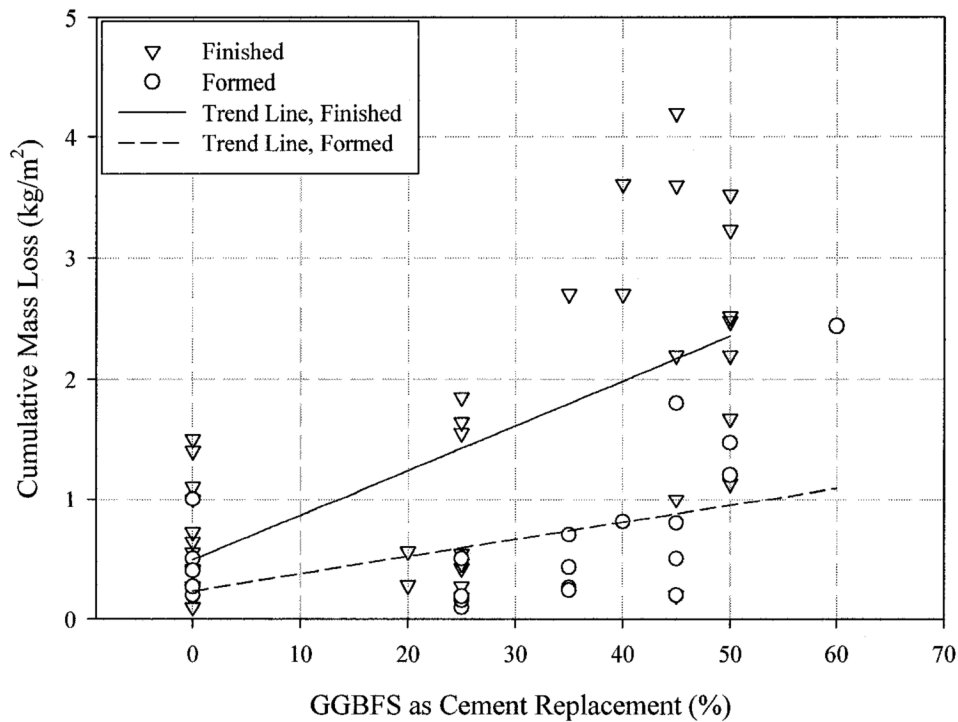


Figure 2-10 Effet de la technique de finition et du pourcentage de remplacement de ciment par du laitier de haut fourneau sur l'écaillage [22]

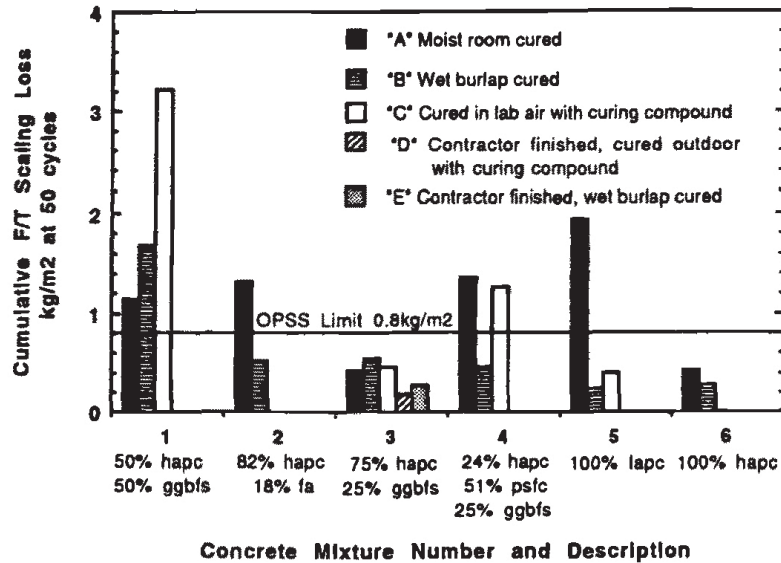


Figure 2-11 Effets du type de liant et de la méthode de cure utilisée sur la masse de débris d'échantillons soumis au test d'écaillage [23]

Tableau 2-2 Influence de l'âge, de la quantité de liant et du rapport E/L sur l'écaillage après 50 cycles [24]

Age		28 days	120 days	2 years
w/b ratio		0.31	0.38	0.38
GGBFS (%)	Binder Content (kg/m ³)	Cumulative Mass Loss (kg/m ²)		
0	360	0.28	0.4	1.45
25	360	0.31	0.5	0.86
40	450	0.39	0.81	0.47
50	360	0.72	1.47	0.81
60	450	0.73	2.44	1.88

2.6.2 Hypothèse et modèle expliquant les problèmes de résistance des ciments au laitier à l'écaillage

Comme pour les bétons avec cendres volantes, certains chercheurs proposent que les problèmes d'écaillage des bétons contenant de forts taux de remplacement en laitier soient dus à la carbonatation des C-S-H [25]. Puisque les ajouts cimentaires consomment le CH pour former des hydrates, il y a ainsi moins de CH disponible dans le mélange. La plus faible disponibilité des CH favorise la carbonatation des C-S-H. Cela a comme conséquence d'augmenter considérablement la porosité de surface du béton et d'affaiblir la peau de celui-ci. La Figure 2-12 présente la séquence de mécanismes proposés pour soutenir cette hypothèse.

- ↑ slag cement → ↓ calcium hydroxide (a)
- ↓ calcium hydroxide → ↑ C-S-H carbonation (b)
- ↑ C-S-H carbonation → ↑ porosity (c)
- ↑ porosity → ↑ carbonation depth (d)
- ↑ carbonation depth → ↓ scaling resistance (e)

Figure 2-12 Logique du modèle proposé [25]

Ce modèle n'explique cependant pas l'effet favorable d'un bon réseau de bulle d'air ($\bar{L} \leq 230 \mu\text{m}$) sur la résistance à l'écaillage. De plus, l'auteur reconnaît dans ses travaux que ce modèle n'explique pas le comportement des échantillons soumis à une cure humide ou avec un agent de cure [25].

2.6.3 Comparaison entre les résultats à l'écaillage pour les bétons avec laitier de haut fourneau

Malgré les résistances à l'écaillage parfois insuffisantes des bétons avec laitier de haut fourneau lorsqu'ils sont soumis aux tests d'écaillage accélérés, il ne faut pas nécessairement conclure que ceux-ci s'écailleront dans des conditions réelles. Plusieurs chercheurs ont démontré qu'il n'y a pas de corrélation forte entre les résultats des tests accélérés et la durabilité des bétons dans des conditions réelles [26] [27]. Les tests accélérés réalisés en laboratoire donnent des résultats généralement plus sévères que les tests réalisés dans des conditions de chantier. Par contre, les tests effectués en laboratoire permettent de discriminer les mélanges ayant les meilleures résistances à l'écaillage de ceux ayant une moins bonne durabilité [27]. En comparant les résultats des Tableau 2-3 et Tableau 2-4 [26] on constate que les tests en laboratoire ont identifié deux bétons qui dépassent largement la valeur maximale tolérée par le Ministère des Transports de l'Ontario (MTO) qui est de $0,8 \text{ kg/m}^2$. Or, lors des tests sur site, le mélange avec 50 % de cendre volante semble véritablement déficient alors que le mélange avec 25 % de cendre volante et 10 % de fumée de silice montre des performances acceptables.

Tableau 2-3 Résistance à l'écaillage des spécimens exposés à des conditions réelles en fonction du type de liant utilisé et de la méthode de cure employée [26]

Mixture	Composition	Average cumulative mass loss (kg/m ²)		
		MTO	Lafarge	Univ. of Toronto
L1	50% slag	1.60	2.02	1.44
L2	35% slag	0.50	1.24	—
L3	25% slag	0.60	0.52	—
L4	25% slag+10% fly ash	1.40	1.55	1.40
L5	15% fly ash	0.36	1.24	—
L6	100% OPC	0.14	0.13	—

Tableau 2-4 Résistance à l'écaillage des spécimens testés en laboratoire en fonction du type de liant utilisé [26]

Mixture	Composition	Average cumulative mass loss (kg/m ²)			
		Burlap and plastic		Curing compound	
		Early finish	Normal finish	Early finish	Normal finish
L1	50% slag	1.28	0.81	1.12	0.68
L2	35% slag	0.15	0.08	0.08	0.12
L3	25% slag	0.12	0.05	0.08	0.14
L4	25% slag+10% fly ash	0.07	0.44	0.11	0.15
L5	15% fly ash	0.41	0.26	0.05	0.07
L6	100% OPC	0.05	0.06	0.07	0.08

2.7 Effet du produit de cure sur l'écaillage

Les produits de cures sont fréquemment utilisés lorsqu'une cure à l'eau est non désirée ou trop complexe à mettre en œuvre. On peut citer en exemple les trottoirs qui sont très rarement sujets à une cure à l'eau. Ceux-ci sont exposés à des sels de déglacage et au gel-dégel. Ils sont donc à risque en ce qui a trait à l'écaillage.

Radlinski [20] propose que l'application d'une membrane de produit de cure à la surface du béton peut aider à réduire la pénétration des sels de déglacage et la pénétration de l'humidité en surface. Les pores seraient donc moins saturés à la surface du béton ce qui contribuerait à améliorer la résistance à l'écaillage.

Cette affirmation est par contre remise en cause par certains chercheurs. Par exemple, certaines recherches suggèrent qu'au final, l'application de scellant ou d'agent de cure pourrait retarder l'écaillage sans pour autant avoir un effet déterminant sur la résistance finale à l'écaillage [28].

Récemment, Ahani et Nokken ont réalisé des tests d'écaillage sur des bétons avec cendres volantes et laitier. Des échantillons mûris avec l'agent de cures ont été comparés avec des échantillons ayant subi une cure humide de 3 jours, 14 jours selon la norme ASTM C672 et 14 jours selon le projet de norme ASTM C672 WK9367 (isolation latéral de l'échantillon voir Tableau 2-1). On constate tout d'abord au Tableau 2-5 que les bétons avec cendre volante ont présenté plus de masse de débris que les bétons avec laitier et les bétons 100 % ciment. Les méthodes de cure les plus efficaces pour les bétons avec cendres volantes sont la méthode ASTM C672 actuelle et une cure humide de 3 jours [29]. Le béton avec cendre volante avec agent de cure a présenté plus de masse de débris que les trois autres méthodes utilisées [29]. Les bétons réalisés avec laitier ont produits des résultats moyens inférieurs à 500 g/m^2 pour toutes les méthodes utilisées. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les mûrissements de 14 jours, mais l'utilisation d'un produit de cure a permis d'obtenir des résultats satisfaisants [29]. Pour ce qui est des bétons formulés avec seulement du ciment Portland, il y a une

amélioration de la durabilité à l'écaillage lorsqu'un produit de cure est appliqué. Il est possible de consulter les résultats de l'étude sur le Tableau 2-5.

Tableau 2-5 Perte de masse de tous les échantillons après 50 cycles de gel dégel pour trois méthodes de mûrissement [29]

Test method	Curing	Cumulative mass loss after 50 cycles (kg/m ²)					
		Fly ash concrete		Slag concrete		Plain concrete	
		1st sample	2nd sample	1st sample	2nd sample	1st sample	2nd sample
ASTM C 672	Standard 14-day moist curing	1.006	1.237	0.302	0.293	0.871	0.630
The proposed replacement method for ASTM C 672	Standard 14-day moist curing	1.528	1.595	0.150	0.155	0.403	0.458
	Curing compound	2.559	2.237	0.536	0.367	0.222	0.229
	3-day curing	1.140	0.928	0.565	0.370	0.543	0.320

Pour les bétons avec laitier et sans ajout cimentaire, étant donné les faibles variations, il est difficile de conclure que la cure améliore réellement la résistance à l'écaillage par rapport à une cure humide de courte durée (3 jours). Par contre, pour les bétons avec cendres volantes, l'utilisation d'un agent de cure ne permet pas d'obtenir d'aussi bons résultats qu'avec une cure humide. En somme, l'utilisation d'un agent de cure semble une alternative intéressante pour les bétons sans remplacement cimentaire ou avec laitier.

CHAPITRE 3 BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Contexte global du projet

Ce projet de recherche porte sur l'étude de l'écaillage dû aux sels fondants des bétons fabriqués avec des ciments contenant des ajouts cimentaires. Ce type de dégradation du béton se caractérise par l'effritement de la surface de celui-ci en flocons de petites dimensions. L'écaillage est un des principaux facteurs à considérer au niveau de la durabilité du béton surtout dans un climat nordique comme celui du Québec. Ce type de dégradation affecte principalement les surfaces des trottoirs, des routes et les dalles. Celles-ci perdent de leurs qualités esthétiques et peuvent devenir inconfortables à la circulation pédestre ou automobile. Ce défaut de surface peut également affecter l'épaisseur de recouvrement de l'acier d'armature ou encore l'adhérence d'une membrane d'étanchéité. À ce jour, il y a un manque de connaissances sur le comportement à l'écaillage des bétons avec liant ternaire utilisés au Québec. Ce projet vise donc à améliorer les connaissances quant à la durabilité à l'écaillage des bétons formulés selon les spécifications du tableau 3101-2 du chap.3, tome VII de la norme 3101 du Ministère des Transports du Québec [30].

3.2 Problématique

Afin de quantifier les risques d'écaillage, plusieurs tests accélérés ont été développés[13], [14], [31]. Au Québec, deux tests accélérés sont principalement utilisés soit les tests de la norme ASTM, CSA et BNQ. Ces tests ont pour objectif de fournir une réponse rapide permettant de déterminer la probabilité que le béton formulé subisse de l'écaillage. Or, dans les dernières années, de plus en plus de donneurs d'ouvrage ont commencé à spécifier des bétons avec liants ternaires. Ces bétons montrent parfois une durabilité déficiente suite aux tests d'écaillage accélérés. Ces résultats incitent à s'interroger sur la durabilité réelle de ce type de béton à l'écaillage, mais également à remettre en question l'efficacité des tests actuellement utilisés sur ce type de béton.

3.3 Objectifs

L'objectif général de ce projet est de mieux comprendre la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec des liants ternaires disponibles au Québec. On vise d'abord à mieux comprendre l'influence de la composition du liant ternaire (cendres volantes, laitier, fumée de silice) sur la performance à l'écaillage selon les normes d'essais ASTM et BNQ. La performance à l'écaillage sera notamment comparée à celle d'un béton binaire de référence avec fumée de silice.

L'autre objectif principal de cette recherche est d'évaluer la performance relative de différentes procédures d'essais accélérés pour pouvoir mieux comprendre l'influence de la durée du mûrissement humide, l'influence de l'utilisation d'un agent de cure et l'influence de l'utilisation d'un géotextile absorbant dans le fond du moule utilisé pour produire les éprouvettes destinées aux essais d'écaillage.

Le projet vise également deux objectifs secondaires. Le premier est d'évaluer la performance relative de la durabilité à l'écaillage d'un béton fabriqué avec un liant ternaire avec deux types de superplastifiant (polynaphtalène sulfonate et polycarboxylate). Le second est d'évaluer l'influence de l'utilisation d'un granulats marginal, du point de vue de l'essai micro-Deval, sur la durabilité à l'écaillage selon la procédure normalisée BNQ 2621-905.

3.4 Méthodologie

Un programme expérimental comportant 4 phases a été conçu pour atteindre les objectifs principaux et secondaires de ce projet de recherche. Ce programme expérimental comprend la production de plusieurs formulations de bétons qui respectent toutes les exigences spécifiques des bétons de type V-S du Ministère des Transports du Québec.

La première phase a pour objectif d'évaluer et de départager l'influence du type de liant ternaire sur la résistance à l'écaillage en laboratoire. Cette phase comporte également l'étude du type de cure sur la résistance à l'écaillage mesurée selon les procédures d'essais ASTM C672 et BNQ 2621-905. La deuxième phase porte sur l'étude de l'influence du type de superplastifiant sur la durabilité à l'écaillage de bétons de type V-S fabriqués avec un liant ternaire de type GUB-S/SF.

La troisième phase vise à mesurer l'influence du facteur d'espacement sur la durabilité à l'écaillage d'un béton de type V-S fabriqué avec un liant GUb-S/SF. La dernière phase porte sur l'étude de la durabilité à l'écaillage d'un béton fabriqué avec un gros granulat marginal du point de vue de sa performance face à l'essai micro-Deval. Le programme expérimental détaillé des 4 phases est présenté dans les paragraphes suivants.

3.4.1 Phase 1

Le programme expérimental de la phase 1 comporte la fabrication de quatre bétons fabriqués avec plusieurs liants différents désignés liants A, B, C et D. Ces 4 bétons sont formulés selon les exigences d'un béton de Type V-S présenté au Tableau 3-1. Le premier béton a été fabriqué avec le liant ternaire A qui est du type GUb-F/SF. Le deuxième béton a été fabriqué avec le liant ternaire B de type GUb-F/SF. Le troisième béton a été fabriqué avec le liant ternaire C de type GUb-S/SF. Le quatrième béton est le béton de référence fabriqué avec un liant binaire de type GUb-SF. Un dosage en liant de 385 kg/m^3 a été utilisé pour produire les trois bétons fabriqués avec les liants ternaires. Le béton fabriqué avec le liant binaire a été dosé avec 365 kg/m^3 de liant. Tous les bétons ont été fabriqués avec le même sable et le même gros granulat de calibre 5-20 mm. Le même superplastifiant de type polynaphtalène sulfonate a été utilisé pour tous les bétons dans cette phase. Pour chaque liant, les dosages en superplastifiant ont été ajustés pour obtenir un affaissement compris dans la plage de $130 \pm 30 \text{ mm}$. Le dosage en agent entraîneur d'air a été choisi pour produire un volume d'air compris entre 6 et 9 % et un facteur d'espacement inférieur à $230 \mu\text{m}$.

Tableau 3-1 Formulation phase 1

Propriétés	Unités	Valeurs
Liants	-	A à D
F'c à 28 jours	MPa	35
Masse de liant	kg/m^3	385 (ternaire) 365 (binaire)
Eau/liant	-	0,40
Gros granulats	mm	5 à 20
Teneur en air	%	6 à 8
Affaissement	mm	130 ± 30
\bar{L}	μm	< 230
Superplastifiant	-	Polynaphtalène

Chacun des quatre bétons de cette phase a servi à produire cinq paires de plaques d'écaillages destinées à l'étude de l'influence du type de mûrissement sur la résistance à l'écaillage. Une paire de plaques a été utilisées pour chaque type de mûrissement décrit au Tableau 3-2. Le mûrissement décrit par l'acronyme « 14 jours » correspond à une cure de 24h dans un moule protégé de l'évaporation à température ambiante suivie de 13 jours dans une chambre de humide à 23°C et 100% d'humidité relative. Il s'agit de la cure normalisée des procédures d'essais ASTM C672 et BNQ 2621-905. Les mûrissements désignés par les acronymes « 28 jours » et « 56 jours » sont des variantes de la cure standard, mais avec des durées totales allongées à 28 et 56 jours respectivement. Ces trois premiers types de mûrissement comportent tous un géotextile absorbant en fond de moule tel que spécifié dans la procédure BNQ 2621-905. Le mûrissement désigné par l'acronyme « 14 jours SG » est similaire au mûrissement « 14 jours » à l'exception du géotextile absorbant qui n'a pas été utilisé dans le fond du moule. Le mûrissement désigné par l'acronyme « 14 jours PC » correspond à une cure réalisée à l'aide d'un produit de cure liquide. Ce produit a été appliqué sur le béton frais selon les recommandations du fabricant. La procédure est détaillée au chapitre 4. Les éprouvettes ont été conservées pendant 14 jours dans le laboratoire avant d'être soumises à l'essai d'écaillage. À la fin des différents types de cure humide, les éprouvettes ont été conservées dans l'air ambiant du laboratoire pendant 14 jours puis soumises à une présaturation de 7 jours avant le début des cycles d'écaillage.

Tableau 3-2 Types de mûrissement des bétons de la phase 1

Type de mûrissement	Acronyme	Technique de cure	Géotextile	Nombre de jours en chambre humide
14 jours avec produit de cure	14 jours PC	Cure chimique	Oui	0
14 jours sans géotextile	14 jours SG	Cure humide	Non	14
14 jours	14 jours	Cure humide	Oui	14
28 jours	28 jours	Cure humide	Oui	28
56 jours	56 jours	Cure humide	Oui	56

3.4.2 Phase 2

Le programme expérimental de la phase 2 comporte la fabrication de trois bétons produits avec le liant ternaire C (Tableau 3-3). Le dosage en liant est de 385 kg/m^3 conformément aux exigences du MTQ pour les bétons de type V-S. Un sable naturel et un gros granulat de calibre 5-20 mm ont été utilisés. Le dosage de l'agent entraîneur d'air a été varié pour produire un volume d'air entraîné compris dans la plage $5 \pm 1 \%$. Les facteurs d'espacement ainsi obtenus sont compris dans la plage 180 à 300 μm . Deux types de superplastifiant ont été utilisés. Un superplastifiant de type polynaphtalène (PNS) a été utilisé pour deux des trois bétons de cette phase. Un superplastifiant de type polycarboxylate (PCP) a été utilisé pour produire le troisième béton de cette phase.

Tableau 3-3 Formulations phase 2

Propriétés	Unités	Valeurs
Liant	-	C
F'c à 28 jours	MPa	35
Masse de liant	kg/m^3	385 (ternaire)
Eau/liant	-	0,40
Gros granulats	mm	5 à 20
Teneur en air	%	$5,0 \pm 1$
Affaissement	mm	130 ± 30
\bar{L}	μm	180 à 300
Superplastifiant	-	Polynaphtalène et Polycarboxylate

3.4.3 Phase 3

Le programme expérimental de la phase 3 comporte la fabrication de 6 bétons fabriqués avec le liant ternaire C. Le dosage en liant est constant à 385 kg/m^3 et le rapport eau/liant est fixé à 0,40 tel que présenté dans le Tableau 3-4. Le dosage de l'agent entraîneur d'air a été varié pour produire des volumes d'air entraîné dans la plage de 4,5 à 8,5 %. Ces formulations ont permis d'obtenir des facteurs d'espacement compris entre 190 et 350 μm . Ce groupe de béton a été utilisé pour étudier l'influence du facteur d'espacement. Ceux-ci ont été variés autour de la valeur de 230 μm . L'analyse des résultats permettra d'évaluer si la valeur prescrite de 230 μm est adéquate pour un liant ternaire ou si celle-ci doit être modifiée.

Tableau 3-4 Formulation phase 3

Propriétés	Unités	Valeurs
Liant	-	C
F'c à 28 jours	MPa	35
Masse de liant	kg/m ³	385 (ternaire)
Eau/liant	-	0,40
Gros granulats	mm	5 à 20
Teneur en air	%	4,5 à 8,5
Affaissement	mm	130 ± 30
\bar{L}	µm	190 à 360
Superplastifiant	-	Polynaphtalène

3.4.4 Phase 4

Le programme expérimental de la phase 4 comporte quatre bétons fabriqués avec le liant C et un gros granulat qualifié de marginal quant à la perte à l'essai micro-Deval (Tableau 3-5). Ce granulat montre une perte qui est juste sous la limite maximale permise selon les exigences de la norme CSA A23.2-29A [32]. Le dosage de l'agent entraîneur d'air a été varié pour produire des volumes d'air entraîné compris entre 3 à 8 %. Ces bétons ont des facteurs d'espacement compris entre 150 et 500 µm. L'analyse de leur durabilité à l'écaillage permettra d'évaluer l'influence d'un gros granulat marginal sur la durabilité d'un béton fabriqué avec un liant ternaire en fonction du facteur d'espacement des bulles d'air.

Tableau 3-5 Formulation phase 4

Propriétés	Unités	Valeurs
Liant	-	C
F'c à 28 jours	MPa	35
Masse de liant	kg/m ³	385 (ternaire)
Eau/liant	-	0,40
Gros granulat marginal	mm	5 à 20
Teneur en air	%	3 à 8
Affaissement	mm	130 ± 30
\bar{L}	µm	150 à 500

CHAPITRE 4 MATÉRIAUX ET PROCÉDURES

4.1 Liants

Dans le cadre de ce projet, trois liants ternaires ainsi qu'un liant binaire ont été utilisés. Pour des raisons de confidentialité, ces liants sont nommés liant A à liant D. Une correspondance entre cette désignation et les informations commerciales est fournie dans une annexe externe à ce rapport et intitulée « codification des matériaux ». Le Tableau 4-1 donne une indication quant à la codification utilisée dans ce rapport.

Tableau 4-1 Liants utilisés

Liants	Codification
3 liants ternaires	Liant A à C
1 liant binaire	Liant D

4.2 Adjuvants

Deux types de superplastifiant (SP) ont été utilisés dans cette étude : un de la famille des polynaphtalènes sulfonates (PNS) et un de type polycarboxylate (PCP). Par des raisons de confidentialité, les noms commerciaux des superplastifiants utilisés, ainsi que les fiches techniques sont données seulement dans l'annexe intitulée « codification des matériaux » externe à ce rapport.

Les adjuvants PNS-1 et PCP-1 représentent les adjuvants utilisés dans les bétons réalisés au laboratoire de l'Université de Sherbrooke. Les autres adjuvants ont été utilisés pour d'autres volets de l'étude.

4.3 Granulat fin

Le sable siliceux naturel provenant de la région de l'Estrie a été utilisé pour produire tous les bétons. La densité à l'état SSS (Saturée Surface Sèche) est comprise entre 2,61 et 2,68. Le pourcentage massique d'adsorption est compris entre 0,90 à 1,30. Le module de finesse du sable est compris entre 2,38 et 2,59.

Le Tableau 4-2 présente les analyses granulométriques du granulat fin utilisé pour ce projet de recherche.

Tableau 4-2 Granulométrie, module de finesse, densité et absorption du granulat fin utilisé

<i>Période d'utilisation (mois/année)</i>	Fraction granulaire 0/5		
	06/14 – 04/15	04/15 – 09/15	09/15 – 12/15
Tamisé cumulé (%)			
10 mm	100,0	100,0	100,0
5 mm	98,7	97,9	97,7
2,5 mm	84,9	83,5	85,0
1,25 mm	69,5	68,6	71,0
0,630 mm	51,0	51,9	53,8
0,315 mm	25,7	26,8	29,1
0,160 mm	8,3	7,0	9,2
0,080 mm	3,9	1,6	3,7
< 0,080 mm	0,0	0,1	2,2
Module de finesse	2,62	2,64	2,54
Densité SSS	2,61	2,68	2,67
Absorption	1,30	0,90	0,93

4.4 Gros granulats

L'ensemble des gros granulats utilisés dans la confection des bétons de ce projet ont été soumis aux tests classiques pratiqués dans le laboratoire et dont les résultats sont donnés dans les paragraphes 4.4.1 et 4.4.2. La densité des granulats 5/14 est resté la même tout au long du projet à 2,73 et celle des granulat 10/20 à 2,76. L'absorption a varié pour le granulat 5/14 entre 0,38 et 0,41%. Pour le granulat 10/20 l'absorption est restée la même tout au long du projet à 0,48%. Deux tests complémentaires ont permis d'apporter des précisions sur les performances des gros granulats utilisés :

➤ *Le test micro-Deval*

La méthode d'essai CSA A23.2-29A permet de déterminer la perte de masse des gros granulats par abrasion en présence d'eau et d'une charge abrasive. Ce test fournit une information quant à la dureté du granulat et sa susceptibilité à se dégrader lors de la

manutention et lors de la séquence de malaxage. La Figure 4-1 présente l'appareil utilisé pour réaliser l'essai micro-Deval.



Figure 4-1 Appareil micro-Deval

Les granulats ont été tamisés, lavés puis séchés pour être pesés. Le tamisage a été effectué avec un appareil de type *GILSON* pendant 3 minutes. Ils étaient par la suite saturés puis soumis à une charge abrasive par rotation du réceptacle micro-Deval.

Pour chacun des granulats testés, deux essais ont été réalisés afin d'obtenir les résultats sur l'ensemble de la courbe granulométrique à savoir :

- Un essai sur les fractions 14-20 : 750 g de 10-14 et 750 g de 14-20 mm pour une rotation de 2h à 100 tr/min.
- Un essai sur les fractions 10-14 mm : 750 g de 5-10 mm et 750 g de 10-14 pour une rotation de 105 min à 100 tr/min.

➤ ***Le test de résistance au gel et au dégel non confiné***

D'après la norme CSA, le test A23.2-24A permet d'évaluer la résistance à la désintégration des gros granulats au gel et au dégel non confiné.

Les granulats ont été soumis à 5 cycles de gel et de dégel. Ils ont été préalablement séparés par fraction et saturés dans une solution d'eau et de chlorure de sodium pendant 24 heures. Après 24 heures l'excédant d'eau est retiré et les granulats saturés subissent leur premier cycle. Les cycles sont décomposés de la manière suivante :

- Une période de gel dans un congélateur dont la température est fixée à -18°C pour une durée de 16h;
- Une période de dégel à température ambiante pendant 8h

À la fin des 5 cycles, les fractions de chacun des contenants étanches étaient rincées, séchées puis tamisées pendant 3 minutes avec le même appareil (*GILSON*) que celui utilisé initialement pour séparer les fractions. La Figure 4-2 présente les contenants et l'aspect typique des fractions granulaires utilisées pour cet essai.



Figure 4-2 Échantillons gel-dégel non confiné

4.4.1 Gros granulat de référence

Le granulat de référence utilisé était un granulat calcaire concassé. Une analyse détaillée est disponible en Annexe B. Le squelette granulaire du gros granulat utilisé est un assemblage de deux fractions de 5/14 et de 10/20 dont les granulométries respectives est détaillées dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 Granulométrie, densité et absorption du gros granulat de référence utilisé

<i>Période d'utilisation (mois/année)</i>	Fraction granulaire 5/14			Fraction granulaire 10/20	
	06/14 – 04/15	04/15 – 10/15	10/15 – 12/15	04/14 – 06/15	06/15 – 12/15
Tamisé cumulé (%)					
28 mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20 mm	100,0	100,0	99,8	93,0	96,0
14 mm	90,0	87,0	89,7	14,8	18,9
10 mm	54,4	45,6	60,8	1,4	3,3
5 mm	7,8	3,5	8,1	0,3	0,9
2,5 mm	1,6	1,2	1,8	0,3	0,7
1,25 mm	1,1	1,0	1,1	0,3	0,6
<1,25 mm	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
Densité SSS	2,73	2,73	2,73	2,76	2,76
Absorption	0,38	0,41	0,41	0,48	0,48

Lors de la première livraison, l'assemblage a été réalisé de telle sorte que la granulométrie de l'assemblage se situe dans le fuseau 5-20 prescrit dans la norme CSA A23.1. Lors des livraisons suivantes de gros granulats, les granulométries de chacune des fractions ont légèrement varié. Les proportions de granulats à combiner ont été adaptées pour se rapprocher au plus près de la courbe (Tableau 4-4 et Figure 4-3). Les squelettes granulaires obtenus étaient tous situés dans le fuseau 5-20 mm prescrit par la norme CSA A23.1.

Tableau 4-4 Proportions de gros granulats de référence utilisés au cours du projet

	Rapport (5/14) / (10/20)	Combinaison
Période du 03/06/2014 au 31/03/2015	3,76	#1
Période du 22/04/2015 au 26/05/2015	5,86	#2
Période du 02/06/2015 au 13/10/2015	5,24	#3
Période du 20/10/2015 au 08/12/2015	2,77	#4

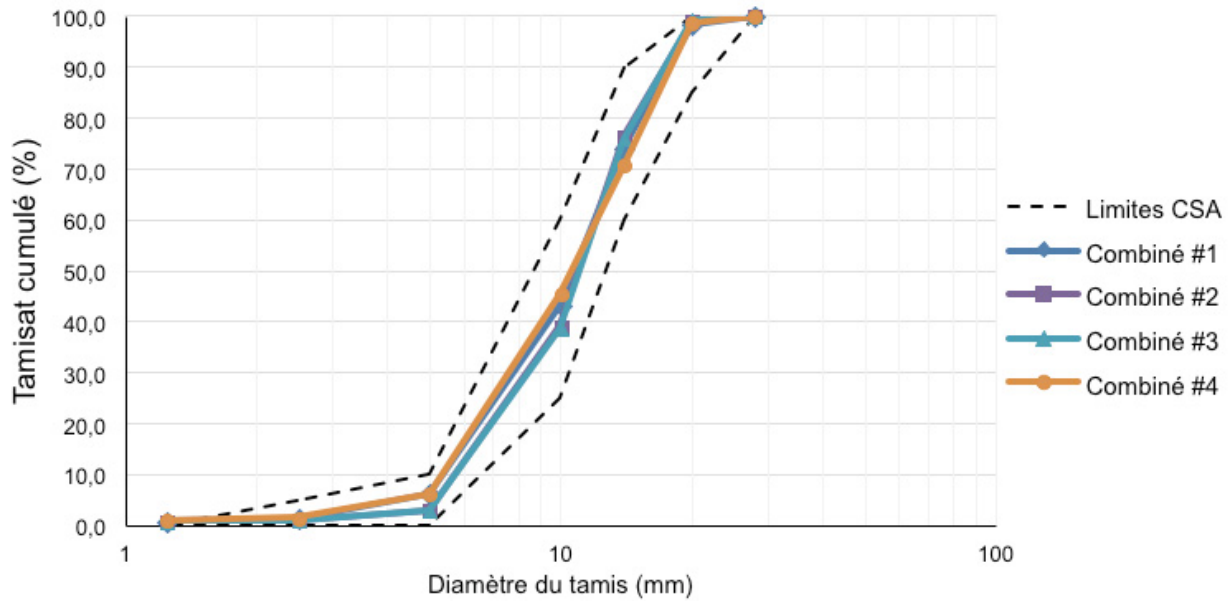


Figure 4-3 Granulométrie au cours du projet des gros granulats combinés

Le Tableau 4-5 et le Tableau 4-6 présentent les résultats des tests micro-Deval et gel-dégel non confiné pour le granulat de référence. Le résultat des tests effectués par l'université de Sherbrooke est indiqué dans la colonne « U. de Sherbrooke ». Les colonnes « Labo #1 » à « Labo #3 » contiennent les résultats des tests pour le même granulat, menés dans différents laboratoires commerciaux et institutionnels.

Tableau 4-5 Résultats du test micro-Deval pour le granulat de référence

Granulat		Pertes moyennes				
		U. de Sherbrooke	Labo #1	Labo #2	Labo #3	
Étalon	5-20 mm	15 %	14 %	non mesurée	non mesurée	Intervalle de référence [11,4 % ; 14,8 %]
Référence	5-20 mm	7 %	11 %	11 %	10 %	<i>Exigence CSA</i> Max 17 % (ou 19%)

Tableau 4-6 Résultats du test gel-dégel non confiné pour le granulat de référence

Granulat	U. de Sherbrooke	Pertes moyennes				
		Labo #1	Labo #2	Labo #3		
Étalon	5-20 mm	10 %	11 %	non mesurée	14 %	Intervalle de référence [8,5 % ; 15,3 %]
Référence	5-20 mm	5 %	4 %	3 %	3 %	<u>Exigence CSA</u> Max 6 % (ou 9%)

4.4.2 Gros granulat marginal

Pour la phase 4, un granulat marginal a été testé afin d’observer son effet sur les comportements des échantillons de laboratoire. Puisque ce granulat provient d’une source non divulguée, plusieurs tests ont été réalisés à l’interne afin de le caractériser. La densité de ce granulat est de 2,71. Sa granulométrie est présentée dans le Tableau 4-7. Cette pierre est désignée dans ce rapport par « Granulat marginal ».

Tableau 4-7 Granulométrie, densité et absorption du gros granulat de référence

<i>Période d'utilisation (mois/année)</i>	Fraction granulaire 5/14	
	11/15	12/15
Tamisat cumulé (%)		
28 mm	100,0	
20 mm	100,0	
14 mm	93,0	
10 mm	63,0	
5 mm	39,0	
2,5 mm	5,0	
1,25 mm	3,0	
<1,25 mm	0,0	
Densité SSS	2,71	
Absorption	0,41	

Le Tableau 4-8 et le Tableau 4-9 présentent les résultats des tests micro-Deval et gel-dégel non confiné pour le granulat marginal. Le résultat des tests effectués par l’Université de Sherbrooke est indiqué dans la colonne « U. de Sherbrooke ». Les colonnes « Labo #1 » à « Labo #3 » contiennent les résultats des tests pour le même granulat, menés par différents laboratoires commerciaux et institutionnels.

Le Tableau 4-8 montre que les pertes maximales évaluées du test micro-Deval sont de 18% et la moyenne sur l'ensemble des laboratoires est de 17,5%. Ce granulat marginal répond aux exigences du tableau 12 de la norme CSA A23.1. Néanmoins, il présente une résistance à l'abrasion limite, très proche des 17% maximum (ou 19% selon les classes d'exposition).

Le Tableau 4-9 montre que ce granulat marginal présente des pertes maximales de 4% et des pertes moyennes de 4% au test de gel-dégel non-confiné. Ce granulat marginal est donc classifié comme résistant au gel-dégel puisqu'il répond aux exigences du tableau 12 de la norme CSA A23.1 dont la limite maximale est de 6% (9% selon la classe d'exposition).

Tableau 4-8 Résultats du test micro-Deval pour le granulat marginal

Granulat	U. de Sherbrooke	Pertes moyennes				
		Labo #1	Labo #2	Labo #3		
Étalon	5-20 mm	15 %	14 %	non mesurée	non mesurée	Intervalle de référence [11,4 % ; 14,8 %]
Référence	5-20 mm	16 %	18 %	18 %	18 %	<u>Exigence CSA</u> Max 17 % (ou 19%)

Tableau 4-9 Résultats du test gel-dégel non confiné pour le granulat marginal

Granulat	U. de Sherbrooke	Pertes moyennes				
		Labo #1	Labo #2	Labo #3		
Étalon	5-20 mm	10 %	11 %	non mesurée	14 %	Intervalle de référence [8,5 % ; 15,3 %]
Référence	5-20 mm	4 %	4 %	4 %	4 %	<u>Exigence CSA</u> Max 6 % (ou 9%)

4.4.3 Caractérisation en laboratoire des éclatements de granulats produits lors de l'essai d'écaillage

4.4.3.1 Origine et objectif du test

Les essais accélérés d'écaillage en laboratoire produisent des débris principalement constitués de mortier et de fragments de gros granulats. La masse totale des débris mesurés lors de l'essai

d'écaillage ne permet pas de séparer l'endommagement au niveau du mortier de l'endommagement résultant de l'éclatement d'un granulat (« pop-out »). Pour mieux caractériser l'endommagement par écaillage, une méthode d'essai a été développée pour quantifier l'endommagement uniquement associé à l'éclatement des granulats.

4.4.3.2 Critères d'identification d'un « pop-out »

Les critères suivants ont été utilisés pour définir les caractéristiques visuelles d'un « pop-out ». Par définition, un éclatement de granulat se caractérise par l'éclatement de celui-ci lorsqu'il est soumis à des cycles de gel-dégel et notamment en présence de sels de déglçage comme c'est le cas lors des essais d'écaillage en laboratoire. L'observation visuelle de plusieurs plaques soumises à l'essai d'écaillage a permis d'identifier quatre critères visuels pour identifier un « pop-out ».

Un endommagement de surface sera identifié comme un « pop-out » s'il satisfait à au moins un de ces quatre critères d'identification :

1. La zone endommagée présente des feuillets détachés de la surface du granulat. Un exemple typique est présenté sur la Figure 4-4.



Figure 4-4 Présence de feuillets en surface due à un « pop-out »

2. La zone endommagée montre un granulat exposé dont le volume interne a été fracturé ou délaminé. La Figure 4-5 présente l'aspect typique de ce type de « pop-out ».



Figure 4-5 Fracture visible dans le granulat

3. La zone endommagée est entourée d'un cône d'arrachement de pâte ou de mortier dont le fond montre clairement un granulat rupturé par délaminage. La Figure 4-6 présente l'aspect visuel typique de ce type de « pop-out ».



Figure 4-6 Cône de pâte détachée et fracture visible à la surface du granulat

4. Le diamètre de la surface du granulat exposé doit être supérieur à 5 mm et présenter des signes de rupture. L'objectif est d'éliminer la contribution du sable et de se concentrer sur les gros granulats. Un exemple des plus petits granulats considérés est montré sur la Figure 4-7.



Figure 4-7 Taille minimale d'éclatement de 5 mm

Ces critères font que les zones présentant un décollement de la pâte en surface sans fracture visible dans le granulat sont ignorées. Il est important de rappeler que pour cet essai, seule la zone occupée par le granulat a été considérée lors du marquage et non pas le cône de pâte entraîné par l'éclatement de celui-ci.

4.4.3.3 Déroulement du test

La caractérisation des éclatements (« pop-out ») comporte cinq étapes. L'utilisation du logiciel gratuit *ImageJ* dans le cadre de ce test. Ce logiciel est disponible en ligne sur le site <https://imagej.nih.gov/>. La procédure d'analyse développée vise à mesurer, pour une plaque d'écaillage donnée, le nombre d'occurrences des éclatements (« pop-out ») et la surface totale de ces éclatements. Elle comporte les principales étapes suivantes :

1. Une feuille transparente (de type acétate) est placée contre la plaque d'écaillage à analyser. La Figure 4-8 illustre cette procédure.



Figure 4-8 Acétate appliquée sur la surface de la plaque à analyser

2. La surface des endommagements satisfaisant la définition d'un éclatement de granulat (« pop-out ») est délimitée à l'aide d'un marqueur à pointe fine afin définir précisément les contours (Figure 4-9).

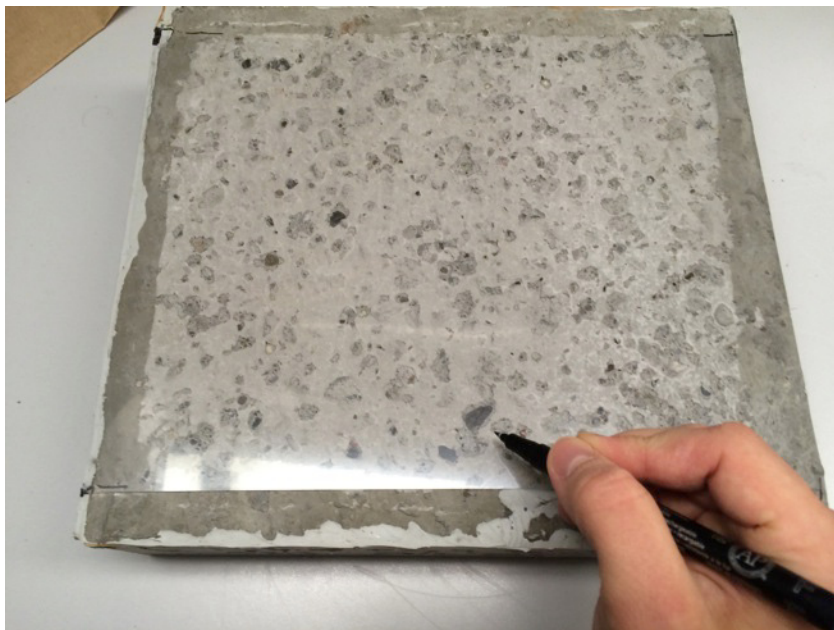


Figure 4-9 Traçage du contour des granulats ayant subi un éclatement (« pop-out ») avec un marqueur à pointe fine

3. Après avoir identifié les contours des granulats ayant subi un éclatement (« pop-out »), les surfaces fermées sont comblées avec un marqueur de même couleur (Figure 4-10).

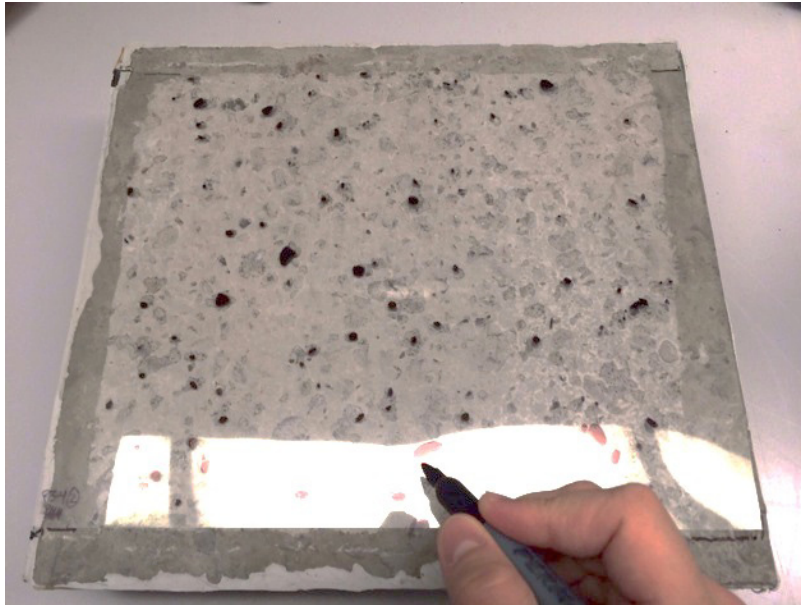


Figure 4-10 Remplissage des contours avec un marqueur de même couleur

4. Après avoir identifié tous les éclatements de plus de 5 mm, l'acétate est retirée puis numérisée à l'aide d'un appareil de bureau standard (numériseur de table, photocopieur multifonctions). La Figure 4-11 présente l'aspect visuel typique d'une acétate avant la numérisation. La Figure 4-12 présente un résultat typique de numérisation.

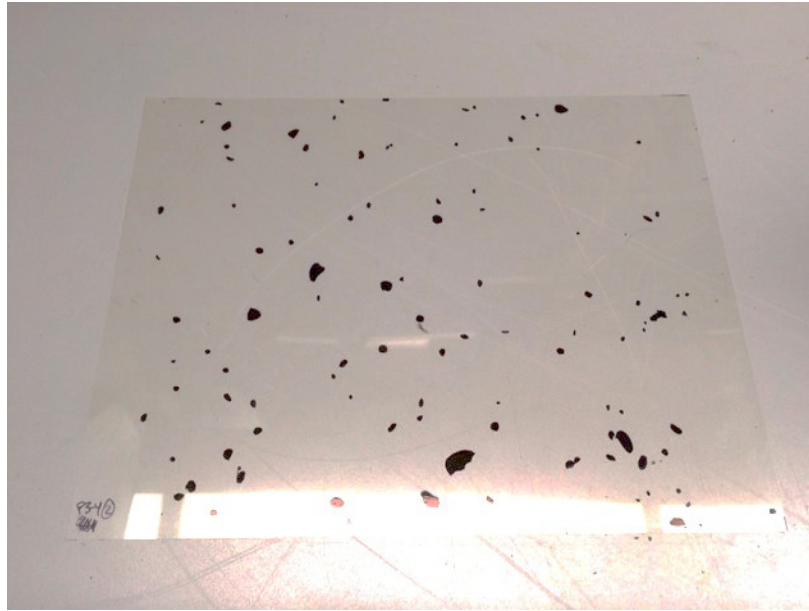


Figure 4-11 Acétate prête à être numérisée



Figure 4-12 Acétate numérisée pour le traitement d'image

5. À partir de l'image numérisée, le traitement suivant est effectué à l'aide du logiciel de traitement d'image *ImageJ*. La procédure d'analyse comporte les étapes suivantes :

- L'image est importée dans le logiciel
- On traite l'image [Process / Binary / Make Binary] pour n'avoir que des pixels blancs et noirs. Tous les tons de gris seront donc noirs.
- À partir de l'onglet [analyze], on obtient le nombre de pixels noirs et de pixels blancs en utilisant la fonction [histogram].
- Dans l'onglet [Plugins / Analyze], le [cell counter] permet de compter le nombre de « pop-out ».

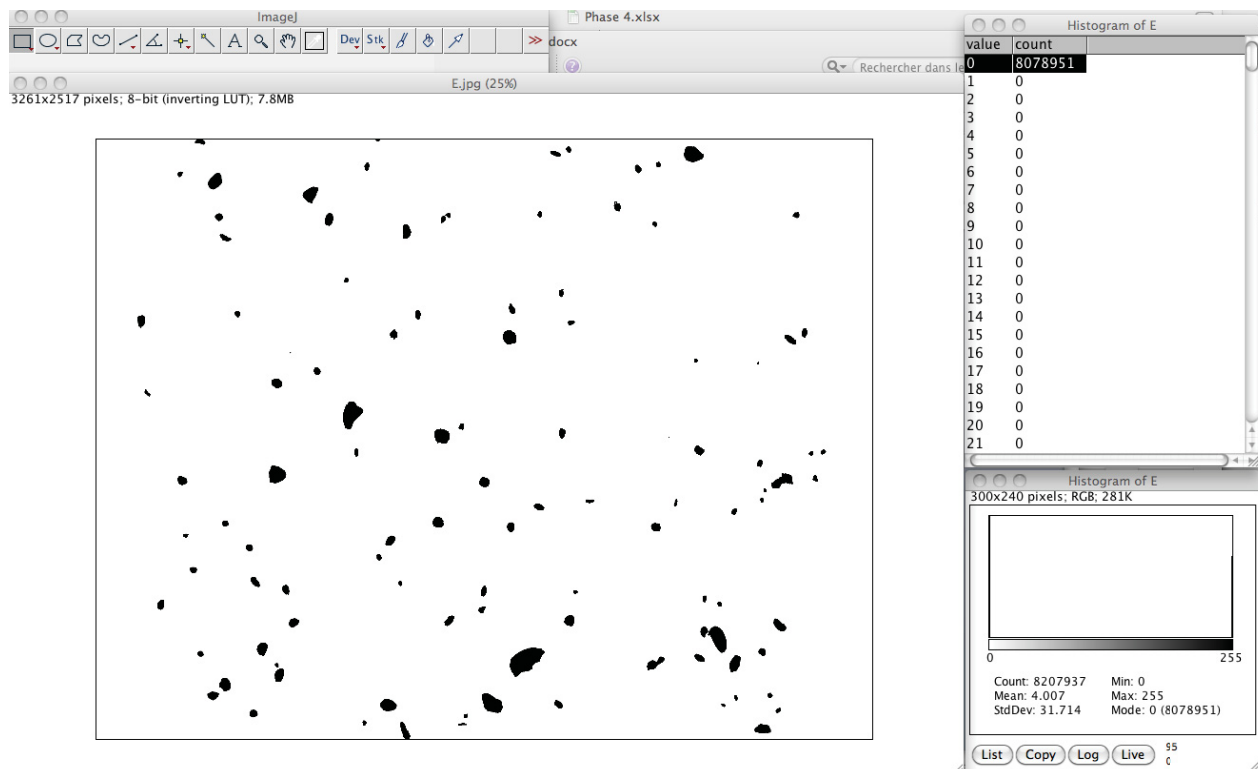


Figure 4-13 Vue du logiciel *ImageJ* lors du traitement d'une image

4.4.3.4 Applications au projet

Dans le cadre de ce projet, six bétons ont été analysés avec cette méthode. Toutes les images traitées sont présentées dans l'annexe A, tandis que les résultats obtenus avec cette méthode sont présentés dans la section 6.4 de ce rapport.

4.5 Mélanges et procédures de gâchage

4.5.1 Procédure de gâchage

Tous les bétons du projet ont été produits dans un malaxeur toupie d'une capacité de 110 L. La procédure de malaxage suivante a été utilisée pour tous les bétons :

1. Rinçage du malaxeur et introduction du sable; malaxage de 30 sec 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 sec
3. Introduction de 50 % de l'eau en masse et de l'AEA dilué dans l'eau de gâchage ; malaxage de 90 sec
4. Introduction du liant; malaxage de 30 sec
5. Ajout de l'eau restante et du SP dilué dans l'eau de gâchage; malaxage de 3 min 30 sec
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'affaissement désiré, prise de la mesure de l'air et masse volumique (CSA A23.2-4C et CSA A23.2-6C). Dans le cas contraire, correction par ajout de SP, reprise du malaxage pour 1 min puis recommencer l'étape 8.

4.5.2 Échantillonnage

Pour chaque béton, l'échantillonnage comporte la fabrication de 11 cylindres de 100 x 200 mm. Ces cylindres de 100 x 200 mm ont été remplis en deux couches égales. Chaque couche a été pilonnée en 25 coups conformément à la norme ASTM C192 [33].

De plus, cinq séries de deux éprouvettes d'écaillage de 250 mm x 200 mm x 75 mm ont été fabriquées pour les bétons de la phase 1 et une série de deux éprouvettes d'écaillage de 250 mm x 200 mm x 75 mm pour les phases 2 à 4. Ces éprouvettes ont été moulées selon les exigences de la norme BNQ 2621-905 annexe B. Pour toutes les éprouvettes réalisées pendant le projet, sauf pour les séries de deux éprouvettes réalisées lors de la phase 1 afin de valider l'effet de cette variable, un géotextile en polypropylène non-tissé ayant une épaisseur de $7 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ et une masse surfacique égale à $900 \text{ g/m}^2 \pm 50 \text{ g/m}^2$ a été déposé au fond du moule. Celui-ci était sec et n'avait

jamais été utilisé auparavant. Ce géotextile a été retiré lors du démoulage des échantillons et avant le début de la cure humide. Les éprouvettes ont été moulées en 1 couche et pilonnées avec un bourroir de 16 mm \pm 1 mm 38 fois. À la fin du pilonnage le moule a été légèrement frappé sur les côtés pour fermer les vides de surfaces. Le surplus de béton a ensuite été régalié avec une barre d'arasement en bois prémouillé de 40 mm x 85 mm x 600 mm. Le béton a été régalié avec la section de 40 mm à une reprise sur le sens de la largeur et à une reprise sur le sens de la longueur avec un mouvement de va-et-vient d'une amplitude d'environ 50 mm. La finition de toutes les plaques d'écaillages, dans le cadre de cette étude, a été réalisée et finie par la même personne.

Une fois la fabrication des cylindres et des plaques d'écaillage terminées, ceux-ci étaient déposés sur une table et recouverts d'une membrane polythène. La membrane était placée de façon à éviter tout contact avec la surface de l'échantillon. Seuls les échantillons de la phase 1 subissant un mûrissement avec un agent de cure ont eu un traitement différent. Une fois la finition de l'échantillon complété, un agent de cure a été appliqué \pm 2 h après la finition de l'échantillon, lorsque la surface de l'échantillon était d'apparence sèche. L'agent de cure a été appliqué avec un pulvérisateur à buse en éventail disponible en quincaillerie. Le produit de cure et durcissant de surface a été appliqué jusqu'à l'obtention d'un film égal et uniforme sur les surfaces des plaques mises à l'essai tout en évitant la formation de flaques sur la surface. La Figure 4-14 présente les plaques une fois le produit appliqué.



Figure 4-14 Plaque d'écaillage une fois l'agent de mûrissement appliqué

4.5.3 Mûrissement

Tous les échantillons ont été démoulés $24 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ après le contact eau-ciment. Seuls les échantillons mûris avec un agent de cure n'ont pas été placés en chambre humide. Ceux-ci ont été démoulés, le géotextile retiré et placé dans une armoire fermée au laboratoire à température ambiante pendant 13 jours avant de suivre la procédure détaillée dans la section 3.4.1 de ce rapport. Les autres échantillons de la phase 1 ont été placés en chambre humide directement après le démoulage et ont suivi les différentes échéances de mûrissement présentées dans la section 3.4.1 soit une cure humide de 14 jours, 14 jours de séchage à température ambiante et 7 jours de présaturation de la surface finie avec une solution de 3 % de NaCl. Pour les phases 2 à 4, les plaques d'écaillage ont suivi le mûrissement typique de la norme BNQ 2621-905 soit 14 jours de cure humide, 14 jours de séchage à température ambiante et 7 jours de présaturation de la surface finie avec une solution de 3 % de NaCl.

Les cylindres 100 x 200 utilisés pour la détermination de la résistance à la compression ont subi un mûrissement en chambre humide conformément à la procédure décrite dans la norme CSA A23.2-12C jusqu'aux essais. Les cylindres utilisés pour la lecture du réseau de bulle d'air à l'état durci ont subi un mûrissement de 14 jours pour permettre à la pâte de s'hydrater suffisamment afin d'assurer une bonne qualité du polissage de surface.

4.5.4 Formulations

4.5.4.1 Phase 1

Le programme de la phase 1 comporte 4 bétons fabriqués avec les liants A, B, C et D (Tableau 4-10). Ces quatre bétons ont un rapport E/L fixe de 0,40 et ils ont été fabriqués avec des dosages en liants compris entre 366 et 394 kg/m^3 . Les dosages en superplastifiant ont été ajustés pour produire des affaissements compris entre 110 et 160 mm. Le dosage de l'agent entraîneur d'air a été ajusté pour obtenir un volume d'air entraîné dans le béton frais compris entre 6,7 et 8,5 %.

Plusieurs formulations préliminaires ont été nécessaires pour optimiser les dosages du couple superplastifiant, agent entraîneur d'air, car les dosages de ces deux types d'adjuvants influencent simultanément l'affaissement et le volume d'air.

Les quatre bétons de la phase 1 ont un facteur d'espacement compris entre 110 μm et 170 μm . La surface spécifique des bulles d'air (α) est comprise entre 25,9 et 39 mm^{-1} . Globalement, les réseaux de bulles d'air de ces quatre bétons sont de bonne qualité, car la surface spécifique des bulles d'air est supérieure à 25 mm^{-1} et le facteur d'espacement est largement inférieur à 230 μm .

Les données présentées au Tableau 4-10 montrent que les quatre bétons de la phase 1 sont représentatifs d'un béton de type V-S protégé par un réseau de bulles d'air entraîné de bonne qualité.

Tableau 4-10 Formulations des bétons de la phase 1

Formulations	Unités	P1-A	P1-B	P1-C	P1-D
Dosage des constituants					
Masse de liant	[kg]	394	389	387	366
Eau	[kg]	158	156	155	146
Sable	[kg/m ³]	781	764	765	794
Granulats	[kg/m ³]	976	955	947	1009
Superplastifiant	[ml/100 kg de liant]	1221	1298	1299	2001
Agent entraîneur d'air	[ml/100 kg de liant]	140	142	125	80
Caractéristiques des bétons frais					
Rapport E/L		0,40	0,40	0,40	0,40
Volume d'air à l'état frais	[%]	6,7	8,5	8,5	8,0
Affaissement	[mm]	110	145	150	160
Masse volumique	[kg/m ³]	2343	2274	2271	2311
Caractéristiques des bétons durcis					
\bar{L}	[μm]	170	110	137	160
α	[1/mm]	30,1	39,0	33,7	25,9
Volume d'air à l'état durci	[%]	4,7	6,1	6,1	6,1
Résistance à la compression					
14 jours	[MPa]	41,0	31,6	43,8	50,5
28 jours	[MPa]	47,9	35,2	44,4	55,4
56 jours	[MPa]	48,6	39,6	49,8	59,0

4.5.4.2 Phase 2

Le programme expérimental de la phase 2 comporte trois bétons fabriqués avec le liant C (Tableau 4-11). Les bétons P2-1 PNS et P2-3 PNS ont été fabriqués avec un superplastifiant de type polynaphtalène. Le béton P2-2 PCP a été fabriqué avec un superplastifiant de type polycarboxylate. Ces trois bétons ont un rapport E/L constant de 0,40. Les affaissements sont compris entre 100 et 150 mm, ce qui satisfait la plage fixée de $130 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$. La teneur en air du béton frais est comprise entre 4,5 et 5,2 %. Le béton P2-1 PNS ne respecte donc pas la plage spécifiée de 5 à 8 % d'air. Pour pouvoir obtenir un volume d'air conforme ($>5 \%$), le béton P2-3 PNS a été fabriqué en utilisant des dosages légèrement plus élevés en superplastifiant et en agent entraîneur d'air. Cette combinaison a permis d'atteindre un volume d'air de 5,2 % et un affaissement conforme de 150 mm.

Le béton P2-2 PCP a un affaissement de 120 mm et un volume d'air de 5,5 %. Ces valeurs sont conformes aux plages spécifiées de $130 \pm 30 \text{ mm}$ et de 5 à 8 % d'air. Ce béton a nécessité un dosage en superplastifiant (PCP) presque deux fois plus faible que les dosages en PNS utilisés pour produire les deux autres bétons de cette phase. Le dosage en agent entraîneur d'air est quant à lui similaire aux dosages des autres bétons.

Le béton P2-1 PNS a un réseau de bulles d'air non conforme, car le facteur d'espacement de $294 \mu\text{m}$ est supérieur à la limite de $230 \mu\text{m}$. On constate aussi que la surface spécifique des bulles est relativement faible à $20,5 \text{ mm}^{-1}$. Les bétons P2-2 PCP et P2-3 PNS ont un réseau de bulle d'air entraîné conforme puisque les facteurs d'espacement sont inférieurs à la limite de $230 \mu\text{m}$.

Tableau 4-11 Formulations des bétons de la phase 2

Formulations		P2-1 PNS	P2-2 PCP	P2-3 PNS
Dosage des constituants				
Masse de liant	[kg]	390	387	388
Eau	[kg]	158	155	155
Sable	[kg/m ³]	788	823	785
Granulats	[kg/m ³]	985	980	824
Superplastifiant	[ml/100 kg de liant]	1050	597	1197
Agent entraîneur d'air	[ml/100 kg de liant]	75	75	83
Caractéristiques des bétons frais				
Rapport E/L		0,40	0,40	0,40
Volume d'air à l'état frais	[%]	4,5	5,5	5,2
Affaissement	[mm]	100	120	150
Masse volumique	[kg/m ³]	2384	2291	2271
Caractéristiques des bétons durcis				
\bar{L}	[μm]	294	183	196
α	[1/mm]	20,5	28,0	27,5
Volume d'air à l'état durci	[%]	3,4	4,8	4,0
Résistance à la compression				
14 jours	[MPa]	47,3	50,7	51,8
28 jours	[MPa]	53,9	56,4	50,9
56 jours	[MPa]	56,9	57,4	56,6

4.5.4.3 Phase 3

Le programme expérimental de la phase 3 comporte 6 bétons qui diffèrent principalement par le dosage de l'agent entraîneur d'air (Tableau 4-12). Dans le Tableau 4-12, deux bétons ont été ajoutés (P1-C et P2-1) car ils permettent d'obtenir un plus grand nombre de valeurs dans la plage visée de facteur d'espacement (137 à 353 μm). Tous les bétons de la phase 3 et du Tableau 4-12 ont été fabriqués avec le liant C et un rapport E/L constant de 0,40. Les dosages en liants sont compris dans la plage de 386 à 393 kg/m³.

Pour tous les bétons du Tableau 4-12, le dosage en agent entraîneur d'air a été ajusté pour produire des facteurs d'espacement variables, mais compris dans la plage de 137 à 353 μm . Pour chacune de ces formulations, le dosage en superplastifiant de type PNS a lui aussi été ajusté pour produire des affaissements compris dans la plage de 130 ± 30 mm.

Les données du Tableau 4-12 montrent que le facteur d'espacement plus faible (137 μm) et la surface spécifique la plus élevée (33,7 mm^{-1}) ont été obtenus avec le plus grand dosage de l'agent entraîneur d'air (125 ml/100 kg de liant). À l'inverse, le facteur d'espacement le plus élevé a été obtenu en utilisant le plus faible dosage de l'agent entraîneur d'air (45 ml/100 kg de liant). C'est en variant les dosages de l'agent entraîneur d'air dans cette plage que les valeurs intermédiaires de facteur d'espacement ont pu être obtenues.

Tableau 4-12 Formulations des bétons de la phase 3

Formulations		P1-C	P2-1	P3-1	P3-2	P3-3	P3-4	P3-5	P3-6
Dosage des constituants									
Masse de liant	[kg]	387	390	387	387	387	393	383	386
Eau	[kg]	155	158	156	156	159	157	155	154
Sable	[kg/m ³]	765	788	791	790	794	804	788	797
Granulats	[kg/m ³]	947	985	988	987	988	1004	994	1008
Superplastifiant	[ml/100 kg de liant]	1299	1050	1200	1199	1199	1249	1250	1250
Agent entraîneur d'air	[ml/100 kg de liant]	125	75	100	110	90	70	55	45
Caractéristiques des bétons frais									
Rapport E/L		0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Volume d'air à l'état frais	[%]	8,5	4,5	5,4	5,6	5,2	5,0	6,0	5,2
Affaissement	[mm]	150	100	120	130	120	130	160	140
Masse volumique	[kg/m ³]	2271	2384	2307	2303	2314	2319	2293	2316
Caractéristiques des bétons durcis									
\bar{L}	[μm]	137	294	190	212	215	263	265	353
α	[1/mm]	33,7	20,5	34,9	26,0	31,8	24,4	22,7	16,6
Volume d'air à l'état durci	[%]	6,1	3,4	3,1	4,4	2,9	2,9	3,7	3,9
Résistance à la compression									
14 jours	[MPa]	43,8	47,3	47,4	48,4	50,6	51,4	47,6	49,0
28 jours	[MPa]	44,4	53,9	51,5	54,5	55,6	56,0	55,0	55,1
56 jours	[MPa]	49,8	56,9	56,3	56,5	57,2	57,5	56,0	61,6

4.5.4.4 Phase 4

Le programme expérimental de la phase 4 comporte quatre bétons fabriqués avec le gros granulat marginal (Tableau 4-13). Ces quatre bétons ont été fabriqués avec le liant C en utilisant un rapport E/L constant de 0,40. Le dosage en liant est compris entre 380 et 393 kg/m³. Les formulations des bétons de la phase 4 diffèrent principalement par les dosages en superplastifiant et en agent entraîneur d'air. Les dosages de l'agent entraîneur d'air ont été ajustés pour produire des facteurs d'espacements compris entre 158 µm et 480 µm. Les dosages en superplastifiant ont aussi été ajustés pour maintenir les affaissements dans la plage de 130 ± 30 mm.

Le facteur d'espacement le plus élevé (480 µm) a été obtenu avec le plus faible dosage de l'agent entraîneur d'air (45 ml/100 kg de liant). Le facteur d'espacement le plus faible (158 µm) a été obtenue avec le dosage de l'agent entraîneur d'air le plus élevé (120 ml/100 kg de liant). Des valeurs intermédiaires de facteur d'espacement ont été obtenues en utilisant des dosages en agent entraîneur d'air de 80 et 100 ml/100 kg de liant.

Tableau 4-13 Formulations des bétons de la phase 4

Formulations	Unités	GM-1	GM-2	GM-3	GM-4
Dosage des constituants					
Masse de liant	[kg]	393	393	380	387
Eau	[kg]	156	158	158	155
Sable	[kg/m ³]	818	808	774	789
Granulats	[kg/m ³]	1023	1010	977	986
Superplastifiant	[ml/100 kg de liant]	1175	1252	1200	1364
Agent entraîneur d'air	[ml/100 kg de liant]	45	80	120	100
Caractéristiques des bétons frais					
Rapport E/L		0,40	0,40	0,40	0,40
Volume d'air à l'état frais	[%]	3,0	3,8	7,6	5,5
Affaissement	[mm]	150	100	120	130
Masse volumique	[kg/m ³]	2417	2384	2299	2386
Caractéristiques des bétons durcis					
\bar{L}	[μ m]	480	334	158	223
α	[l/mm]	15,9	20,1	29,2	25,8
Volume d'air à l'état durci	[%]	1,9	2,6	5,8	4,1
Résistance à la compression					
14 jours	[MPa]	51,2	48,5	37,7	49,8
28 jours	[MPa]	51,1	48,2	44,2	56,3
56 jours	[MPa]	57,0	58,8	45,4	56,2

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

5.1 Effet du type de liant – Phase 1

5.1.1 Résistance à la compression

La Figure 5-1 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les quatre bétons de la phase 1. Les courbes indiquent que pour tous les liants, les résistances à la compression dépassent l'exigence de 35 MPa à 28 jours. Le liant binaire D a produit les résistances à la compression les plus élevées à 14, 28 et 56 jours. Les liants C et A montrent des développements de la résistance à la compression très similaires avec des valeurs à 56 jours comprises entre 48,6 et 48,8 MPa respectivement. Le liant ternaire B se démarque nettement avec des résistances à la compression plus faibles à 14 (31,6 MPa), 28 (35,2 MPa) et 56 jours (39,6 MPa).

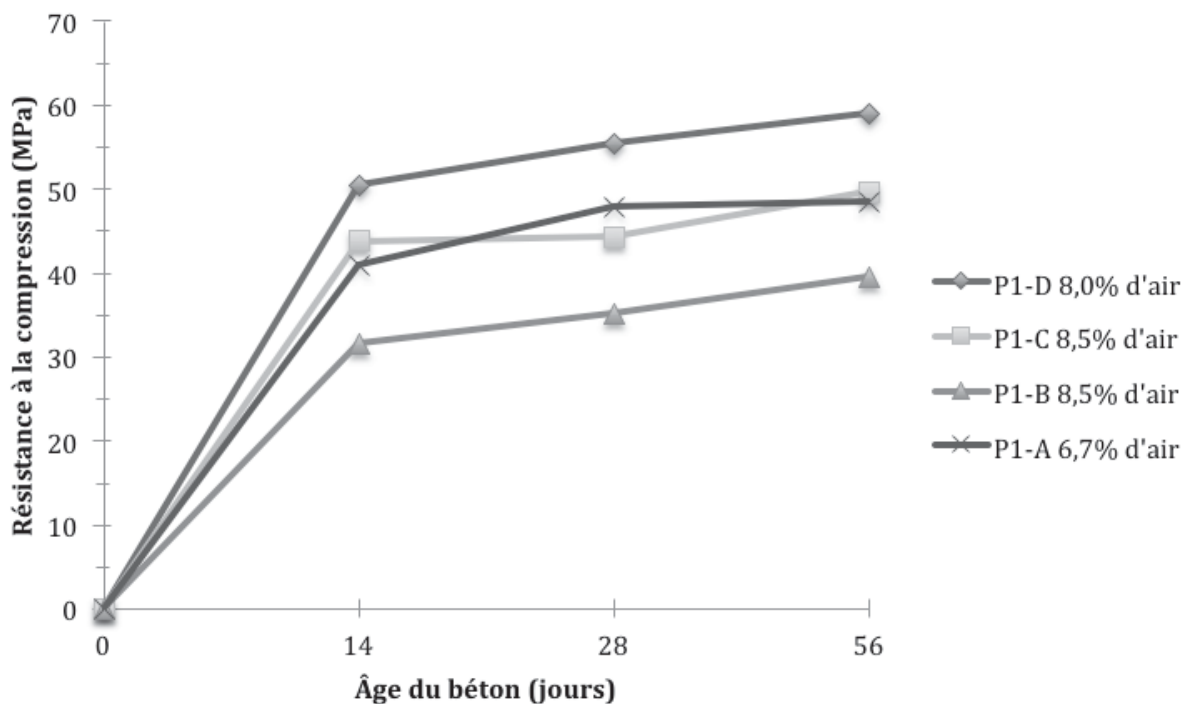


Figure 5-1 Résistance à la compression des bétons de la phase 1

5.1.2 Durabilité à l'écaillage

Le Tableau 5-1 présente les résultats des essais d'écaillages obtenus avec les quatre bétons de la phase 1. Chaque béton (P1-A, P1-B, P1-C et P1-D) a été utilisé pour produire cinq paires d'éprouvettes (A et B) et ainsi mesurer la résistance à l'écaillage en utilisant cinq méthodes de cure. Le Tableau 5-1 présente les masses de débris (g/m^2) à la fin des 56 cycles de gel-dégel. Les courbes détaillées de la progression de la masse des débris en fonction du nombre de cycles sont présentées dans l'Annexe A. Cette annexe présente aussi l'aspect visuel des éprouvettes à la fin du test.

Pour le béton P1-A, l'écart moyen entre les éprouvettes A et B est de 198 g/m^2 . Pour les bétons P1-B, P1-C et P1-D cet écart est de 187, 138 et 111 g/m^2 . L'écart moyen global pour tous les bétons de la phase 4 est de 158 g/m^2 . Cet écart est un indice de la répétabilité de l'essai. Cet écart est considéré normal et acceptable puisqu'il est suffisamment faible pour permettre de bien démarquer les performances relatives à l'écaillage des bétons testés. La norme BNQ 2621-905 ne contient pas de section traitant de la précision de l'essai. Il n'y a donc pas de critère établi afin de déterminer l'écart acceptable entre deux plaques.

Le Tableau 5-1 comporte deux conditions d'essais pour lesquelles l'écart entre les éprouvettes A et B est nettement supérieur à la moyenne de 158 g/m^2 . Il s'agit du béton P1-A testé avec la cure 14 jours SG et le béton P1-C testé avec la cure 56 jours. Dans ces 2 conditions d'essais, les écarts sont respectivement de 388 g/m^2 et 401 g/m^2 . Cette plus grande variabilité sera prise en compte lors de l'analyse détaillée de ces résultats d'écaillage présenté dans le prochain chapitre.

Tableau 5-1 Masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des bétons de la phase 1

Bétons	Méthode de cure	Masse de débris (g/m ²)		
		Éprouvette A	Éprouvette B	Moyenne
P1-A $\bar{L} = 170 \mu\text{m}$	14 jours PC	829	990	910
	14 jours SG	67	455	261
	14 jours	273	103	188
	28 jours	219	159	189
	56 jours	493	703	598
P1-B $\bar{L} = 110 \mu\text{m}$	14 jours PC	961	1045	1003
	14 jours SG	1805	2008	1906
	14 jours	2192	1874	2033
	28 jours	2442	2367	2404
	56 jours	1614	1868	1741
P1-C $\bar{L} = 137 \mu\text{m}$	14 jours PC	816	888	852
	14 jours SG	250	240	245
	14 jours	115	161	138
	28 jours	128	289	209
	56 jours	651	1052	852
P1-D $\bar{L} = 160 \mu\text{m}$	14 jours PC	240	487	364
	14 jours SG	143	205	174
	14 jours	241	79	160
	28 jours	72	129	100
	56 jours	107	134	120

5.2 Phase 2 - Effet du type superplastifiant

5.2.1 Résistance à la compression

La Figure 5-2 présente les courbes de développement de la résistance à la compression des bétons de la phase 2 en fonction du temps de mûrissement. Les courbes des trois bétons fabriqués avec le liant C sont pratiquement confondues. Ces résultats montrent que le type de superplastifiant (PCP et PNS) a peu influencé le développement de la résistance à la compression. Tous les bétons de cette phase respectent la résistance minimale de 35 MPa à 28 jours.

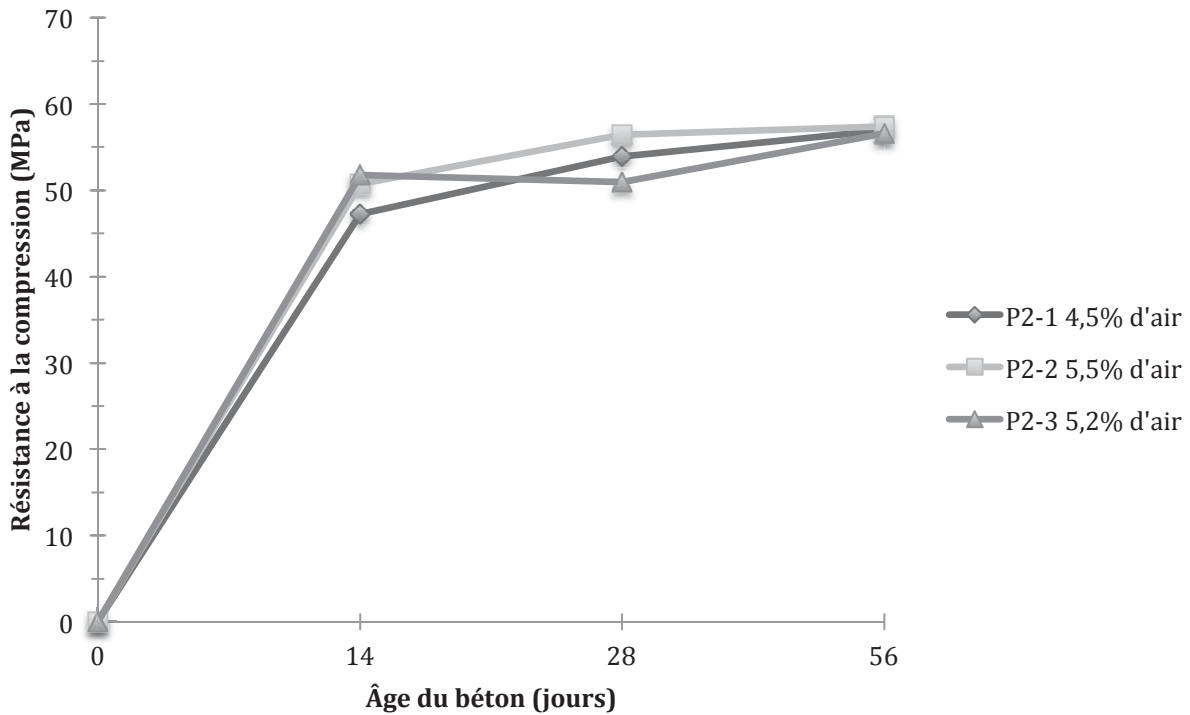


Figure 5-2 Résistance à la compression des bétons de la phase 2

5.2.2 Résistance à l'écaillage

Les résultats des essais d'écaillage des bétons de la phase 2 sont présentés au Tableau 5-2. Pour chaque béton (P2-1 PNS, P2-3 PCP et P2-2 PNS) le tableau présente le facteur d'espacement, le volume d'air à l'état durci et la masse des débris de chacune des paires d'éprouvettes (A et B). Pour cette phase, l'écart moyen entre les éprouvettes A et B est de 114 g/m^2 . L'écart maximal a été obtenu avec le béton P2-1PNS (294 g/m^2). Pour les deux autres bétons, l'écart est inférieur à 41 g/m^2 . Globalement, on considère que cette variabilité est acceptable et qu'elle permet de différencier les performances relatives à l'écaillage. Les courbes détaillées de la progression de la masse des débris en fonction du nombre de cycles de gel-dégel et l'aspect visuel des éprouvettes à la fin du test sont présentées dans l'Annexe A.

Le béton P2-1 PNS possède un facteur d'espacement relativement élevé de $294 \mu\text{m}$. Cette valeur est supérieure à la limite maximale de $230 \mu\text{m}$ habituellement spécifiée dans la norme CSA A23.1. On constate que la masse de débris dépasse la limite maximale de 500 g/m^2 . Les deux

autres bétons ont une masse de débris inférieurs à 500 g/m² pour des facteurs d'espacement inférieurs à 200 µm. L'analyse détaillée des résultats sera présentée au chapitre suivant.

Tableau 5-2 Masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des bétons de la phase 2

Bétons	\bar{L} [µm]	Volume d'air dans le béton durci [%]	Masse de débris		
			Éprouvette A [g/m ²]	Éprouvette B [g/m ²]	Moyenne [g/m ²]
P2-1 PNS	294	3,4	940	646	793
P2-3 PNS	196	4,0	370	361	366
P2-2 PCP	183	4,8	231	190	210

5.3 Effet du facteur d'espacement – Phase 3

5.3.1 Résistance à la compression

La Figure 5-3 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les six bétons de la phase 3. Tous ces bétons ont été fabriqués avec le liant C. La principale différence entre ces bétons est le volume d'air entraîné qui est compris dans la plage de 5 à 6 %. La Figure 5-3 montre que toutes les courbes sont pratiquement identiques. Ces résultats sont cohérents puisque seul le volume d'air entraîné différencie ces bétons et ceux-ci varient peu puisqu'ils sont compris entre 5 et 6 %.

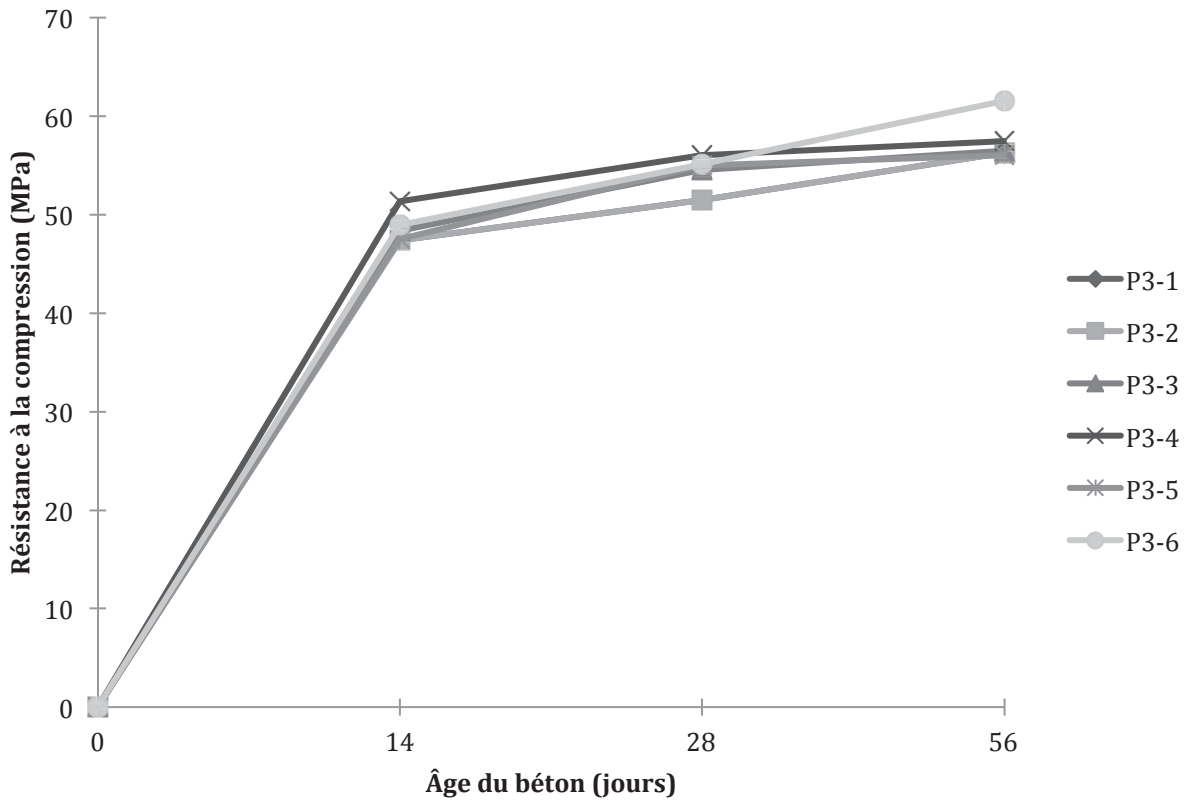


Figure 5-3 Résistance à la compression des bétons de la phase 3

5.3.2 Résistance à l'écaillage

Les résultats des essais à l'écaillage des six bétons de la phase 3 sont présentés au tableau Tableau 5-3. Pour chaque béton, on y retrouve le facteur d'espacement, le volume d'air dans le béton durci et la masse des débris de chacune des paires d'éprouvettes (A et B). Pour cette phase, l'écart moyen entre les éprouvettes A et B est de 178 g/m^2 . Cet écart moyen est comparable à ceux des phases 1 et 2.

Les bétons P3-5 et P3-6 présentent des écarts plus importants de 388 et 442 g/m^2 respectivement. Ces valeurs plus élevées sont tout de même considérées acceptables, car la masse moyenne des débris de ces deux bétons est relativement élevée ($> 500 \text{ g/m}^2$). Les courbes détaillées de la progression de la masse de débris en fonction du nombre de cycles de gel-dégel et l'aspect visuel des éprouvettes à la fin du test sont présentées à l'Annexe A.

Les bétons P3-1 à P3-3 ont des masses moyennes de débris largement inférieures à 500 g/m². Tous ces bétons ont aussi un facteur d'espacement inférieur à la limite maximale de 230 µm. Les bétons P3-4 et P3-5 ont des facteurs d'espacement très voisins (263 et 265 µm) mais les masses de débris sont très différentes soit 229 g/m² et 608 g/m² respectivement. Ces deux résultats suggèrent qu'il existe une certaine variabilité associée aux mesures du facteur d'espacement et de la masse de débris. Ils suggèrent aussi qu'un facteur d'espacement de l'ordre de 260 µm semble constituer une valeur maximale pour ne pas dépasser la limite de 500 g/m². Le béton P3-6, qui possède un facteur d'espacement bien supérieur à 230 µm, montre une masse de débris supérieurs à 500 g/m². L'analyse détaillée de ces résultats sera présentée au chapitre suivant.

Tableau 5-3 Masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des bétons de la phase 3

Bétons	\bar{L} [µm]	Volume d'air dans le béton durci [%]	Masse de débris		
			Éprouvette A [g/m ²]	Éprouvette B [g/m ²]	Moyenne [g/m ²]
P3-1	190	3,1	130	197	163
P3-2	212	4,4	204	236	220
P3-3	215	2,9	240	145	193
P3-4	263	2,9	252	206	229
P3-5	265	3,7	801	415	608
P3-6	353	3,9	738	296	517

5.4 Phase 4 - Effet de l'utilisation d'un granulat marginal

5.4.1 Résistance à la compression

La Figure 5-4 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les quatre bétons de la phase 4. Pour cette phase, il faut noter que la chambre d'écaillage a subi un bris pendant une semaine. Les éprouvettes touchées ont été conservées saturées à la température ambiante du laboratoire durant cette période. Cette procédure est en conformité avec la procédure normalisée BNQ 2621-905 annexe B. Tous les bétons de cette phase ont été fabriqués avec le liant C et avec le gros granulat marginal. La principale différence entre ces bétons est le volume d'air qui varie de 3,0 à 7,6 %.

Les courbes de la Figure 5-4 montrent que le béton GM-3 possède une résistance à la compression plus faible que celles des trois autres bétons de cette phase. Cette plus faible résistance découle principalement du volume d'air plus élevé dans ce béton (7,6 %). Tous les bétons de cette phase respectent l'exigence minimale de 35 MPa pour la résistance à la compression. Ces résultats confirment que le granulat marginal permet d'atteindre des résistances à la compression similaires à celles obtenues avec le granulat de référence.

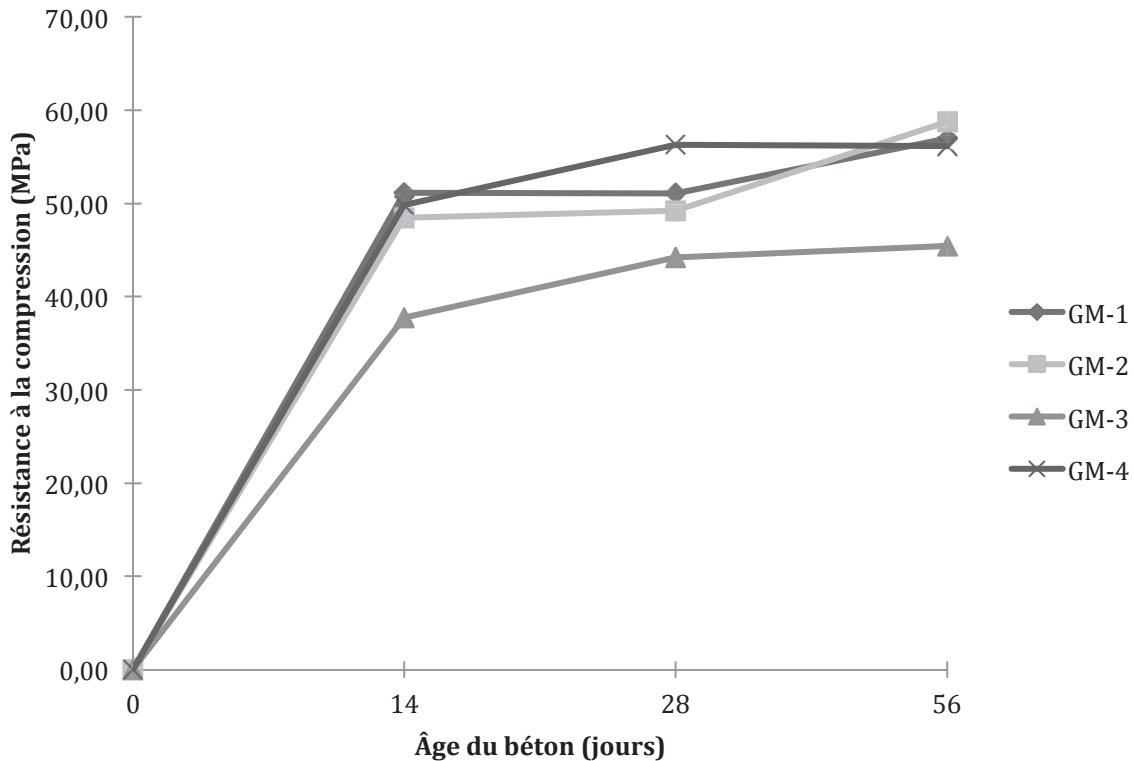


Figure 5-4 Résistance à la compression des bétons de la phase 4

5.4.2 Résistance à l'écaillage

Les résultats des essais d'écaillage pour ces quatre bétons sont présentés au Tableau 5-4. Pour chaque béton, on y retrouve le facteur d'espacement, le volume d'air dans le béton durci et la masse des débris pour chaque paire d'éprouvettes (A et B).

Dans cette phase, la moyenne des écarts entre les éprouvettes A et B est de 301 g/m^2 . Cet écart moyen est le plus grand des quatre phases de cette étude. Cela suggère que l'utilisation d'un granulat marginal tend à augmenter la variabilité de la masse des débris pour une paire d'éprouvettes provenant d'un même béton.

Trois des quatre bétons de cette phase montrent une masse de débris supérieurs à la limite de 500 g/m². Deux bétons ont un facteur d'espacement relativement élevé (>330 µm), ce qui peut contribuer à expliquer l'écaillage important. Cependant, un de ces trois bétons a un facteur d'espacement faible (158 µm) et montre néanmoins un écaillage important (929 g/m²). Cette mauvaise résistance à l'écaillage pourrait résulter d'une plus grande quantité d'éclatement des particules du gros granulat. Le béton GM-4 montre un écaillage acceptable (357 g/m²) en présence d'un facteur d'espacement tout juste sous la limite maximale de 230 µm. Ces résultats d'écaillage seront analysés plus en détail au chapitre suivant.

Les courbes détaillées de progression de la masse de débris en fonction du nombre de cycles de gel-dégel et l'aspect visuel des éprouvettes à la fin du test sont présentées à l'Annexe A.

Tableau 5-4 Masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des bétons de la phase 4

Béton	\bar{L} [µm]	Volume d'air dans le béton durci [%]	Masse de débris		
			Éprouvette A [g/m ²]	Éprouvette B [g/m ²]	Moyenne [g/m ²]
GM-1	480	1,9	937	655	796
GM-2	334	2,6	570	1049	810
GM-3	158	5,8	1109	750	929
GM-4	223	4,1	399	314	357

CHAPITRE 6 Analyse des résultats

Ce chapitre porte sur l'analyse détaillée des résultats expérimentaux présentés au chapitre 5. Cette analyse est divisée en quatre sections principales qui portent sur chacune des quatre phases expérimentales de ce projet.

6.1 Influence du type de liant et du type de mûrissement sur la résistance à l'écaillage mesuré en laboratoire

La phase 1 a pour objectif de déterminer l'effet du type de liant utilisé ainsi que l'effet de la méthode de mûrissement sur les performances à l'écaillage des bétons avec liant ternaire. Dans cette phase, les bétons réalisés présentent tous d'excellents réseaux d'air afin de s'assurer qu'ils soient représentatifs des bétons utilisés dans la pratique usuelle. Actuellement, un béton soumis au test BNQ 2621-905 doit produire moins de 500 g/m^2 de débris pour être jugé conforme.

L'expérience pratique récente suggère que la durabilité à l'écaillage du béton peut varier en fonction du type de liant ternaire. Cette phase vise à comparer la performance à l'écaillage de trois liants ternaires et d'un liant binaire et à comparer l'influence du type de cure sur la durabilité à l'écaillage de chacun de ces quatre liants.

Les méthodes de cure étudiées sont les suivantes :

- **14 jours PC** : l'utilisation de produits de cure est très fréquente lorsque les conditions de chantier ne permettent pas une cure humide. Pour ce projet on a sélectionné, un produit de cure de type durcissant de surface (détails dans l'annexe externe à ce rapport) ne nécessitant pas d'être enlevé avant l'application d'une membrane. Cet agent de cure a été appliqué sur les éprouvettes d'écaillage dès que la surface le permet et conservé pendant 14 jours à l'intérieur à température ambiante. Après ces 14 jours qui remplacent la cure humide, les échantillons sont soumis à la même procédure de la norme BNQ 2621-905.

- **14 jours SG** : L'utilisation d'un géotextile qui recouvre le fond des moules d'écaillage est apparue dans les dernières versions de la norme BNQ. Puisque cette pratique est questionnée par certains laboratoires et chercheurs et qu'elle complique la procédure d'essai, des éprouvettes ont été testées sans géotextile afin de les comparer à celles testées avec géotextile. Hormis cette dérogation, la procédure expérimentale est conforme à la procédure normalisée BNQ 2621-905.
- **14 jours** : Cette condition correspond aux éprouvettes témoins testées exactement selon la procédure de la norme BNQ 2621-905. Elles permettent notamment de comparer la performance à l'écaillage des bétons fabriqués avec les 4 liants retenus par cette étude.
- **28 jours** : Tel que présenté dans la revue de la littérature, certains auteurs suggèrent que l'augmentation de la durée de cure humide pourrait avoir un effet bénéfique sur certains liants avec ajouts cimentaires. La cure standard de 14 jours a donc été allongée à 28 jours de cure humide. Suite à cette cure prolongée, la procédure d'écaillage utilise les mêmes étapes que celles de la norme BNQ 2621-905.
- **56 jours** : La cure humide a été prolongée à 56 jours avant d'utiliser les mêmes étapes de la norme BNQ 2621-905 une fois les éprouvettes sorties de la chambre humide.

6.1.1 Liant A

Le béton fabriqué avec le liant A possède un très bon réseau de bulle d'air avec un \bar{L} de 170 μm et un pourcentage d'air dans le béton frais de 6,7 %. La Figure 6-1 présente la masse de débris, après 56 cycles de gel-dégel, pour chaque type de cure des éprouvettes de béton fabriquées avec le liant A. L'écart entre les éprouvettes A et B est indiqué par le trait vertical ajouté au sommet de chaque colonne de l'histogramme.

La cure normalisée de 14 jours permet au liant A de développer une bonne résistance à l'écaillage, car la masse de débris est de moins de 200 g/m^2 , ce qui est largement inférieur à la limite maximale de 500 g/m^2 .

La cure de 14 jours sans géotextile augmente légèrement la masse de débris. Cependant, la grande variabilité entre les éprouvettes A et B fait qu'il est difficile de conclure sur l'effet défavorable de l'absence de géotextile sur la résistance à l'écaillage pour le liant A.

L'utilisation du produit de cure a un effet nettement défavorable sur la durabilité à l'écaillage du béton fabriqué avec le liant A (Figure 6-1). La masse de débris dépasse largement la limite maximale de 500 g/m^2 . Ces résultats suggèrent que cette méthode de mûrissement ne permet pas à la pâte près de la surface de développer une faible porosité, une bonne imperméabilité et une résistance à la traction suffisante pour obtenir une bonne durabilité à l'écaillage.

Les résultats de la Figure 6-1 montrent que le prolongement de la cure à 28 jours n'a pas d'effet sur la résistance à l'écaillage obtenue avec le liant A. Cependant, les résultats obtenus après 56 jours de cure humide indiquent clairement un effet défavorable sur la résistance à l'écaillage. La plus faible résistance à l'écaillage pourrait découler soit de la saturation plus importante de la porosité capillaire et/ou de la saturation du réseau de bulles d'air près de la surface.

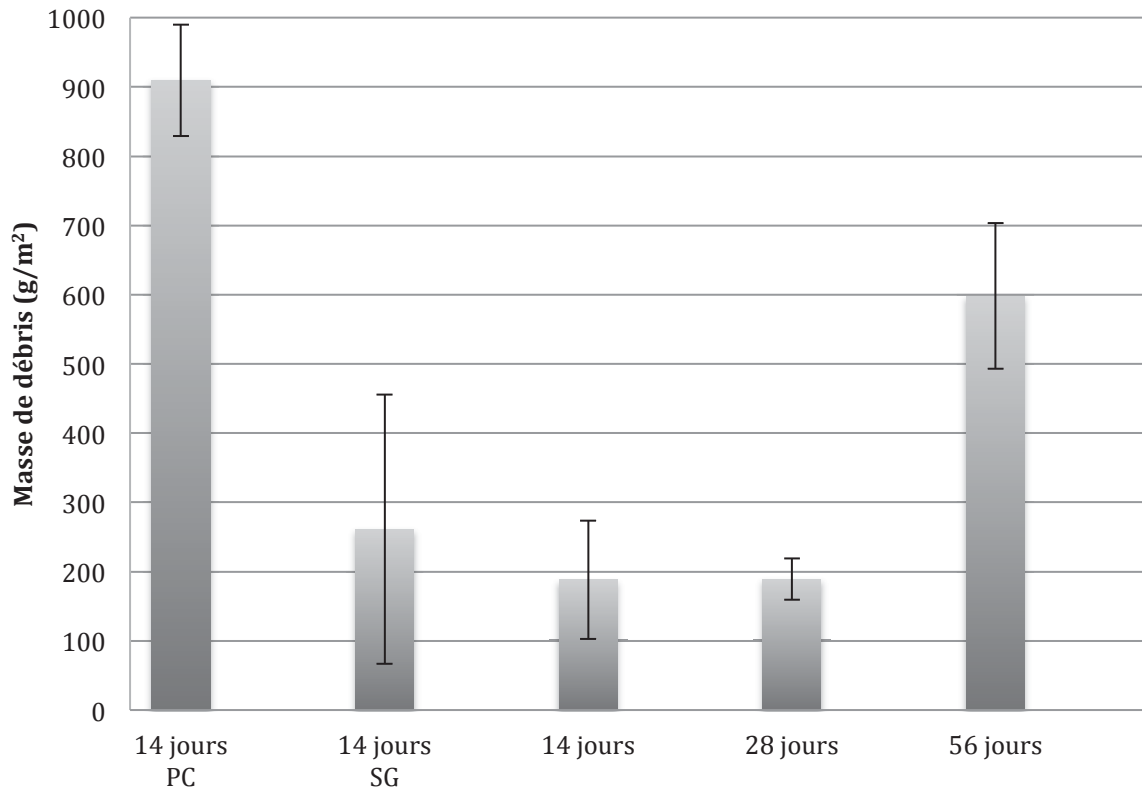


Figure 6-1 Influence du type de cure sur la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des éprouvettes fabriquées avec le liant A

6.1.2 Liant B

Le béton fabriqué avec le liant B possède un très bon réseau de bulle d'air avec un \bar{L} de 110 μm et un pourcentage d'air dans le béton frais de 8,5 %. La Figure 6-2 présente la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel pour les différents types de cure des éprouvettes fabriquées avec le liant B. La cure normalisée de 14 jours avec géotextile ne permet pas de développer une durabilité à l'écaillage acceptable selon les critères de la norme BNQ 2621-905. En effet, la masse de débris de plus de 2000 g/m^2 excède largement la limite maximale de 500 g/m^2 . L'absence de géotextile donne un résultat similaire, ce qui suggère que le géotextile n'influence pas la résistance à l'écaillage du béton fabriqué avec le liant B.

Contrairement aux résultats obtenus avec le liant A, l'utilisation d'un produit de cure a un effet favorable sur la résistance à l'écaillage du béton fabriqué avec le liant B. Cependant, la masse

de débris après 56 cycles (1000 g/m^2) est néanmoins demeurée supérieure à la limite maximale de 500 g/m^2 . Ces résultats suggèrent que l'utilisation d'un produit de cure semble améliorer la résistance à l'écaillage des bétons qui sont intrinsèquement moins durables à l'écaillage, comme c'est le cas du béton fabriqué avec le liant B. Comparativement au mûrissement de 14 jours, l'utilisation d'un produit de cure pourrait contribuer plus efficacement au comblement et à l'imperméabilisation (diminution de la pénétration des ions chlore) du réseau capillaire plus grossier obtenu avec le liant B près de la surface exposée. Une étude microstructurale de la pâte près de la surface serait utile pour mieux comprendre l'effet du produit de cure sur la durabilité à l'écaillage obtenue avec le liant B.

Les résultats de la Figure 6-2 montrent que le prolongement de la cure à 28 et 56 jours n'a pas beaucoup d'effet sur la durabilité à l'écaillage obtenue avec le liant B. La cure de 28 jours augmente légèrement la masse de débris alors que la cure de 56 jours diminue légèrement par rapport à la valeur obtenue avec 14 jours de cure. Globalement, pour le liant B, ces résultats démontrent que l'utilisation d'une cure prolongée ne permet pas d'atteindre une durabilité à l'écaillage qui satisfait l'exigence maximale de 500 g/m^2 demandée par la norme BNQ 2621-905.

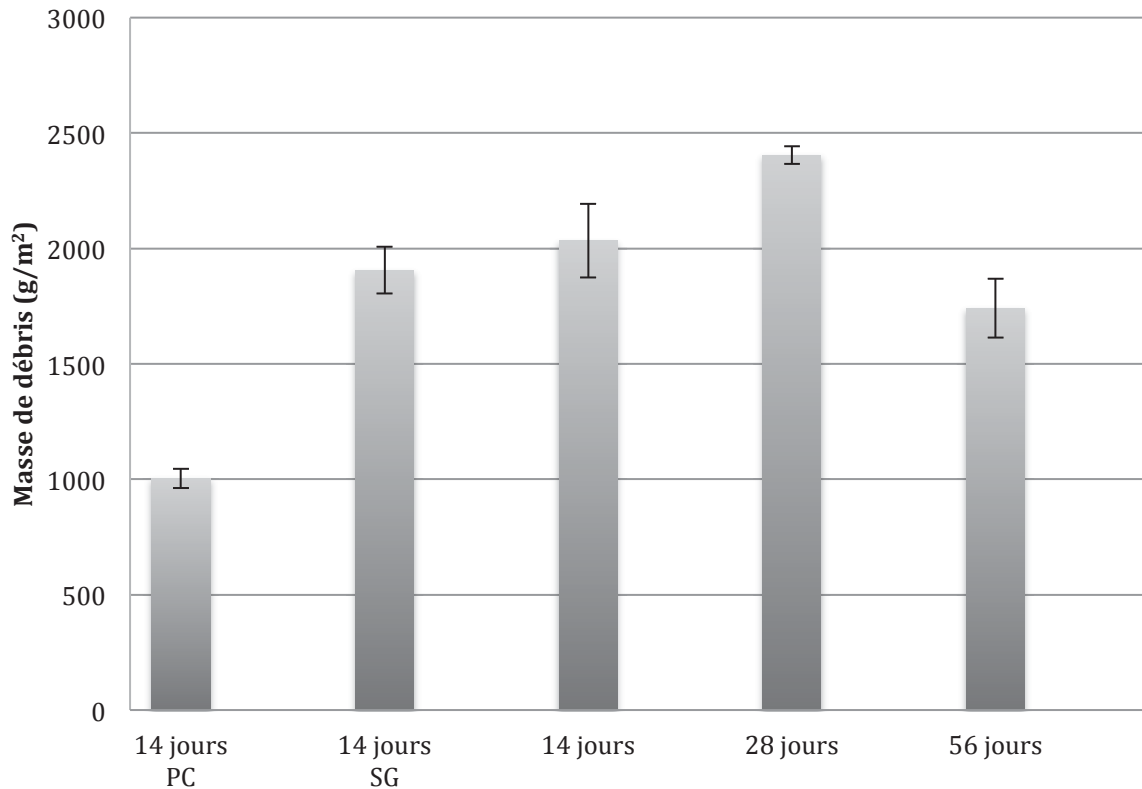


Figure 6-2 Influence du type de cure sur la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des éprouvettes fabriquées avec le liant B

6.1.3 Liant C

Le béton fabriqué avec le liant C possède un très bon réseau de bulle d'air avec un \bar{L} de 137 μm et un pourcentage d'air dans le béton frais de 8,5 %. La Figure 6-3 présente la masse des débris après 56 cycles de gel-dégel pour chaque type de cure des éprouvettes de béton fabriquées avec le liant C. L'écart entre les éprouvettes A et B indique que la répétabilité est acceptable et permet de bien différencier l'influence des types de cures sur la résistance à l'écaillage.

La cure normalisée de 14 jours est la plus favorable pour la résistance à l'écaillage du liant C. La masse des débris de 138 g/m^2 est très inférieure à la limite maximale de 500 g/m^2 . La cure de 14 jours sans géotextile produit une légère augmentation de la masse de débris (245 g/m^2), mais la masse totale des débris demeure sous la limite de 500 g/m^2 . Dans le cas du liant C,

l'absence de géotextile semble donc avoir un effet légèrement défavorable sur la durabilité à l'écaillage.

L'utilisation d'un produit de cure à un effet nettement défavorable sur la résistance à l'écaillage du liant C (Figure 6-3). La masse de débris (850 g/m^2) dépasse largement la limite de 500 g/m^2 . À nouveau, ce résultat indique que ce type de mûrissement ne permet pas au liant C de développer sa pleine durabilité à l'écaillage. Une étude supplémentaire serait requise pour pouvoir expliquer l'effet défavorable de ce type de cure. Il faudrait pouvoir évaluer comment ce type de cure influence la porosité et la microstructure de la pâte située près de la surface exposée.

Le prolongement de la cure jusqu'à 28 jours a peu d'effet sur la résistance à l'écaillage des bétons fabriqués avec le liant C. Cependant, les résultats de la Figure 6-3 montrent clairement l'effet défavorable du prolongement de la cure jusqu'à 56 jours. La masse de débris atteint alors plus de 500 g/m^2 . Il est difficile d'expliquer l'effet défavorable d'une cure de 56 jours. Il pourrait résulter d'une plus forte saturation de la pâte et/ou de la saturation du réseau d'air au voisinage de la surface exposée.

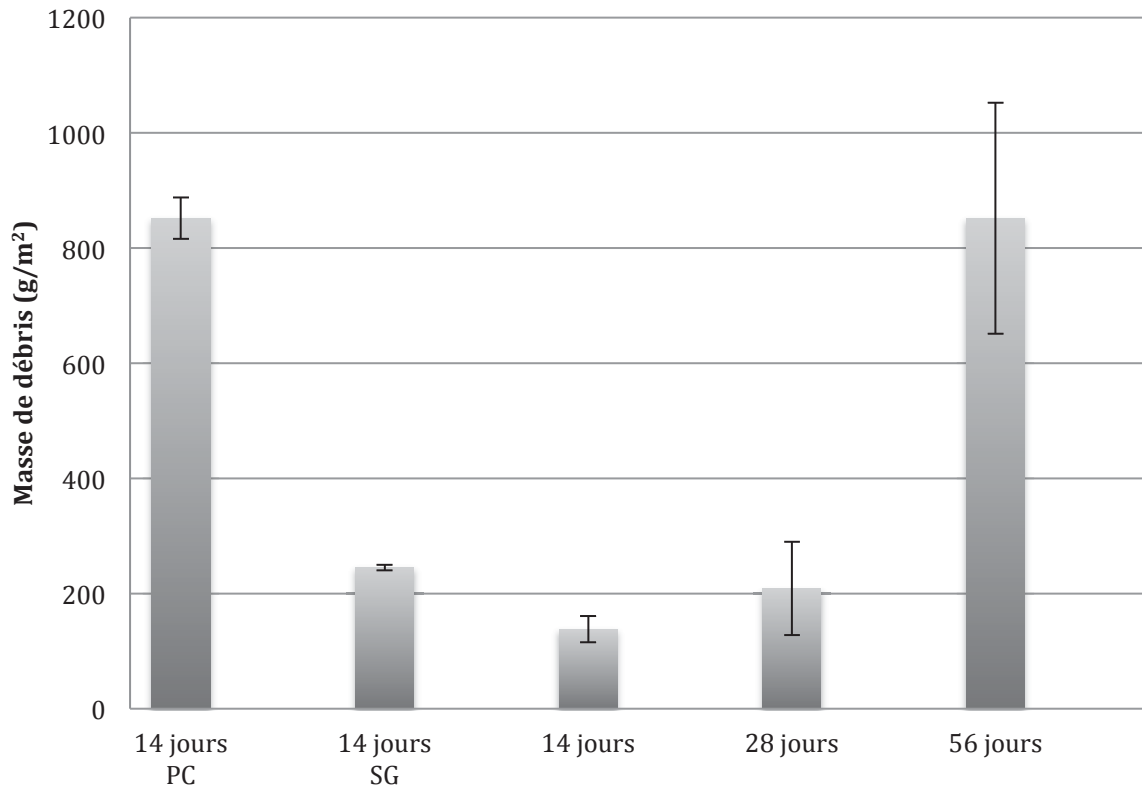


Figure 6-3 Influence du type de cure sur la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des éprouvettes fabriquées avec le liant C

6.1.4 Liant D

Le béton fabriqué avec le liant D possède un très bon réseau de bulle d'air avec un \bar{L} de 160 μm et un pourcentage d'air dans le béton frais de 8,0 %. La Figure 6-4 présente la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel pour chaque type de cure des éprouvettes de bétons fabriquées avec le liant D. L'écart entre les éprouvettes A et B est suffisamment faible pour bien mettre en évidence l'effet du type de cure sur la masse de débris. La cure normalisée de 14 jours avec géotextile permet au liant D de développer une très bonne résistance à l'écaillage, car la masse de débris de 174 g/m^2 est très inférieure à 500 g/m^2 . L'absence de géotextile n'a pas d'effet sur la masse des débris (Figure 6-4).

L'utilisation d'un produit de cure suivie d'un mûrissement à l'air ambiant de 14 jours a un effet défavorable sur la résistance à l'écaillage du béton produit avec le liant D. La masse de débris est alors de près de 400 g/m^2 , ce qui est environ 2 fois plus élevé que celle obtenue avec le mûrissement humide de 14 jours. Cependant, même si l'utilisation du produit de cure est

défavorable, la masse de débris est néanmoins acceptable puisqu'elle est tout juste inférieure à la limite maximale de 500 g/m².

Pour le liant D, le prolongement de la cure humide jusqu'à 28 et 56 jours semble améliorer très légèrement la résistance à l'écaillage qui était déjà, après 14 jours, tout à fait acceptable.

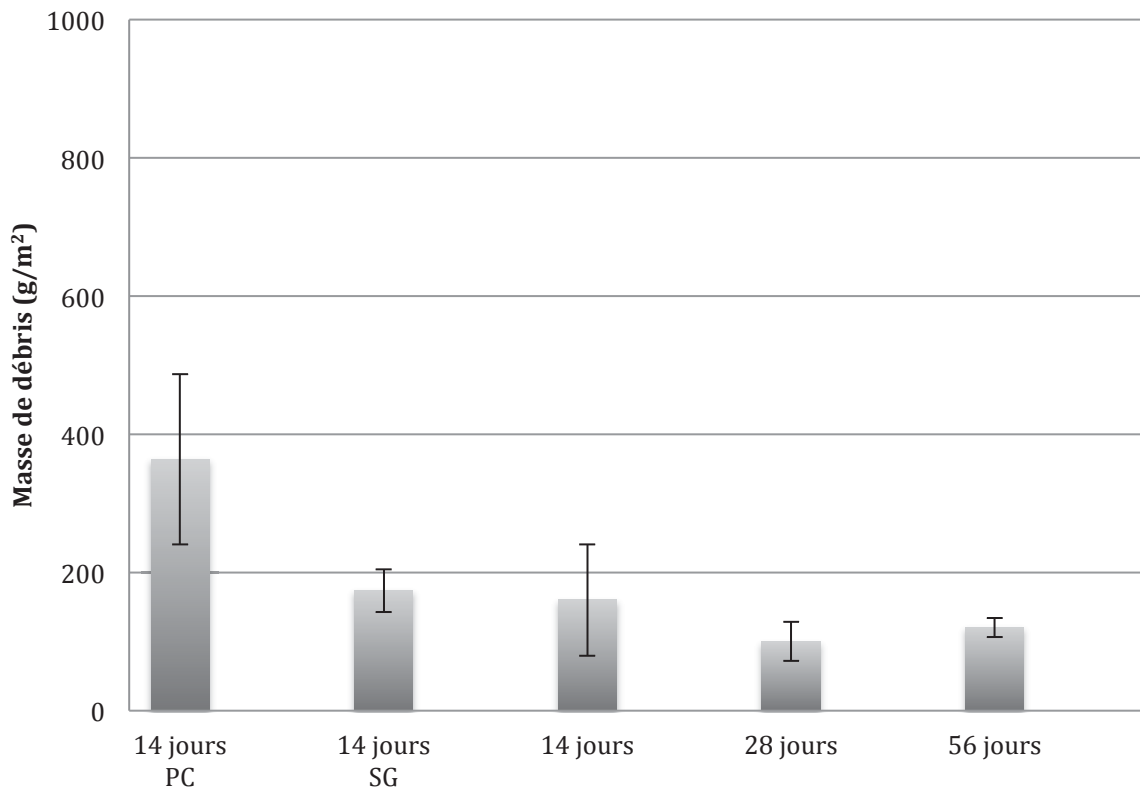


Figure 6-4 Influence du type de cure sur la masse de débris après 56 cycles de gel-dégel des éprouvettes fabriquées avec le liant D

6.1.5 Analyse globale de l'influence du type de cure sur la résistance à l'écaillage des liants testés

La Figure 6-5 présente l'influence du type de cure sur la masse de débris de tous les liants testés (A à D).

L'analyse de cette figure sera accomplie en fonction d'un type de cure spécifique en débutant par la cure normalisée de 14 jours avec géotextile.

Cette cure normalisée permet aux liants A, C et D de développer une bonne résistance à l'écaillage lorsque les bétons sont formulés selon les exigences du type V-S (380 kg de liant/m³, E/L = 0,4) et qu'ils sont protégés par un réseau de bulles d'air de bonne qualité ($\bar{L} < 200 \mu\text{m}$). Les résultats de la Figure 6-5 montrent clairement que la cure normalisée ne permet pas au liant B de développer une bonne résistance à l'écaillage malgré un réseau de bulle d'air de bonne qualité et une formulation conforme au type V-S. Ces résultats suggèrent que le liant B possède une résistance à l'écaillage intrinsèquement plus faible que celle des deux autres liants ternaires (A et C) et du liant binaire (D).

L'absence de géotextile au fond du moule a très peu d'effet sur la résistance à l'écaillage de tous les liants testés. Pour les liants A, C et D la masse des débris est légèrement plus grande, mais l'augmentation est faible et demeure généralement à l'intérieur des écarts entre les éprouvettes A et B. Pour le liant B, les résultats sont similaires puisque l'absence de géotextile a engendré une légère diminution de la masse de débris, mais l'écart est très faible et à nouveau est à l'intérieur des écarts entre les plaques A et B. Globalement, les résultats de la Figure 6-5 démontrent que le géotextile n'a pas d'effet sur le résultat du test d'écaillage BNQ 2621-905, autant pour les bétons qui ont une faible masse de débris (liant A, C et D) que pour le béton qui a une masse de débris élevée (liant B) avec la cure humide de 14 jours. Ces résultats suggèrent de ne plus utiliser de géotextile en fond de moule puisqu'il est inutile du point de vue de la résistance à l'écaillage et qu'il entraîne des coûts supplémentaires liés à l'achat, la pose et l'enlèvement du géotextile lors de l'essai.

L'influence du produit de cure sur la résistance à l'écaillage dépend fortement du type de liant utilisé. Le mûrissement à l'aide du produit de cure a un effet très défavorable pour les liants A et C. Ces deux liants produisent des bétons avec une bonne résistance à l'écaillage lorsqu'ils sont soumis à une cure normalisée de 14 jours, mais leur résistance à l'écaillage devient nettement insuffisante avec la cure chimique. Cette méthode de cure ne remplace donc pas une cure humide de 14 jours dans le cas spécifique des liants A et C. Il faut cependant noter que la cure chimique est probablement préférable à l'absence totale de cure. Puisque cette dernière condition n'a pas été testée, il est donc difficile d'évaluer l'efficacité absolue de la cure chimique sur la résistance à l'écaillage des liants A et C. En pratique la cure chimique est

probablement préférable à l'absence de cure. C'est aussi une cure qui est relativement économique et simple à mettre en œuvre. Pour mieux évaluer l'efficacité de la cure chimique sur la résistance à l'écaillage, il serait nécessaire d'entreprendre une étude in situ de la durabilité à l'écaillage de structure en service.

Le béton fabriqué avec le liant B se démarque des trois autres, car c'est le seul pour lequel la cure chimique est favorable pour la résistance à l'écaillage. Même s'il y a un avantage à utiliser ce type de cure, il demeure que la masse des débris est néanmoins largement supérieure à la limite de 500 g/m^2 . Ces résultats suggèrent que pour ce liant spécifique (B) il pourrait être avantageux d'utiliser le produit de cure lorsque le béton est exposé à un environnement sévère propice au développement de l'écaillage. Cette hypothèse devrait cependant faire l'objet d'une validation par une étude in situ de la résistance à l'écaillage de structure de béton en service.

Le liant D présente la meilleure résistance à l'écaillage et c'est aussi celui qui est le moins affecté par l'utilisation d'un agent de cure chimique. En effet, les résultats de la Figure 6-5 montrent que même avec une cure chimique, la résistance à l'écaillage est acceptable (masse de débris $< 500 \text{ g/m}^2$). Ces résultats suggèrent que la cure chimique conviendrait pour les bétons fabriqués avec ce type de liant. Cette technique est particulièrement bien adaptée à la pratique en raison de son coût et sa simplicité de mise en œuvre.

L'effet d'une cure prolongée de 28 jours diffère fortement en fonction du type de liant. Le prolongement de la cure à 28 jours a très peu d'effet sur la résistance à l'écaillage des bétons fabriqués avec les liants A, C et D. Elle a cependant pour effet de diminuer davantage la résistance à l'écaillage du liant B qui n'est déjà pas acceptable avec 14 jours de mûrissement humide. Globalement, ces résultats suggèrent que le prolongement de la cure à 28 jours n'est pas une approche efficace pour améliorer la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec le liant B.

Les effets d'une cure prolongée à 56 jours sont différents en fonction du type de liant et aussi relativement différents des effets mesurés avec la cure de 28 jours. Cette fois, la cure de 56

jours diminue nettement la résistance à l'écaillage des bétons fabriqués avec les liants A et C. À l'inverse, elle est légèrement favorable dans le cas du liant B, quoique la masse de débris soit quand même largement supérieure à la limite de 500 g/m^2 . Pour le liant D, la cure prolongée de 56 jours n'a pas d'effet sur la résistance à l'écaillage. Globalement ces résultats suggèrent qu'il n'y a aucun avantage à utiliser une cure prolongée de 56 jours du point de vue de la résistance à l'écaillage des liants testés.

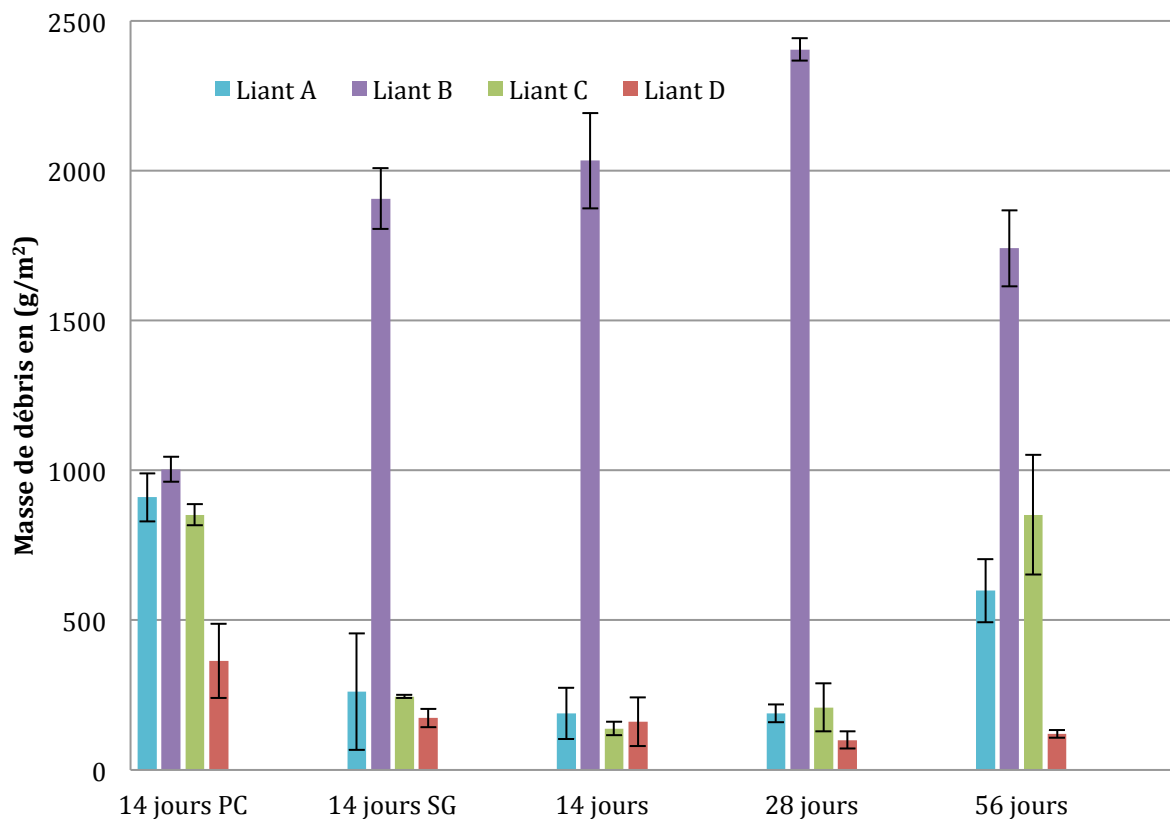


Figure 6-5 Influence du type de cure sur la résistance à l'écaillage des liants A, B, C et D

6.2 Influence du type de superplastifiant sur la résistance à l'écaillage mesurée en laboratoire

L'objectif de la phase 2 est d'étudier l'influence potentielle du type de superplastifiant (PNS et PCP) sur la résistance à l'écaillage d'un béton de type V-S. Pour ce faire, deux bétons ont été fabriqués avec le superplastifiant de type polynaphtalène (PNS) et un béton a été fabriqué avec le superplastifiant de type polycarboxylate (PCP). Le liant C a été utilisé pour produire tous

ces bétons. La Figure 6-6 présente la masse des débris après 56 cycles de gel-dégel en fonction du type de superplastifiant et du facteur d'espacement des bétons de la phase 2.

Les bétons P2-2 PCP et P2-3 PNS ont des facteurs d'espacement similaires (183 μm et 196 μm) respectivement. Puisqu'ils ont été produits avec le même liant C, leur durabilité à l'écaillage devrait donc être semblable. Les résultats de la Figure 6-6 montrent que c'est effectivement le cas puisque la masse des débris du béton P2-2 PCP est de 210 g/m^2 et celle du béton P2-3 PNS est de 366 g/m^2 . Ces valeurs sont inférieures à la limite de 500 g/m^2 et correspondent à une bonne durabilité à l'écaillage. Ces résultats montrent que les deux types de superplastifiants permettent d'obtenir une bonne résistance à l'écaillage pourvu que le facteur d'espacement obtenu soit suffisamment faible, c'est à dire inférieur à la limite de la norme CSA A23.1 de 230 μm maximum.

L'importance de satisfaire la limite maximale de 230 μm est notamment démontrée par la masse de débris obtenue avec le béton P2-1 PNS. Pour ce béton le facteur d'espacement de 294 μm excède cette limite et la masse de débris dépasse la limite maximale de 500 g/m^2 . Des données de la documentation techniques indiquent que le type de superplastifiant peut influencer le réseau d'air entraîné. Par exemple, certains superplastifiant de type polycarboxylate favorisent l'entraînement d'air et tendent à augmenter le diamètre moyen des bulles d'air [34]–[37]. Les résultats de la phase 2 montrent que même si c'est effectivement le cas, c'est véritablement le facteur d'espacement qui est le paramètre qui gouverne la durabilité à l'écaillage.

Ainsi, quels que soient le type de superplastifiant, le volume d'air ou la surface spécifique des bulles, on peut présumer que la durabilité à l'écaillage des bétons de type V-S de la norme 3101 du MTQ sera bonne, pourvu que le facteur d'espacement soit faible, c'est à dire inférieur à la limite maximale usuelle de 230 μm .

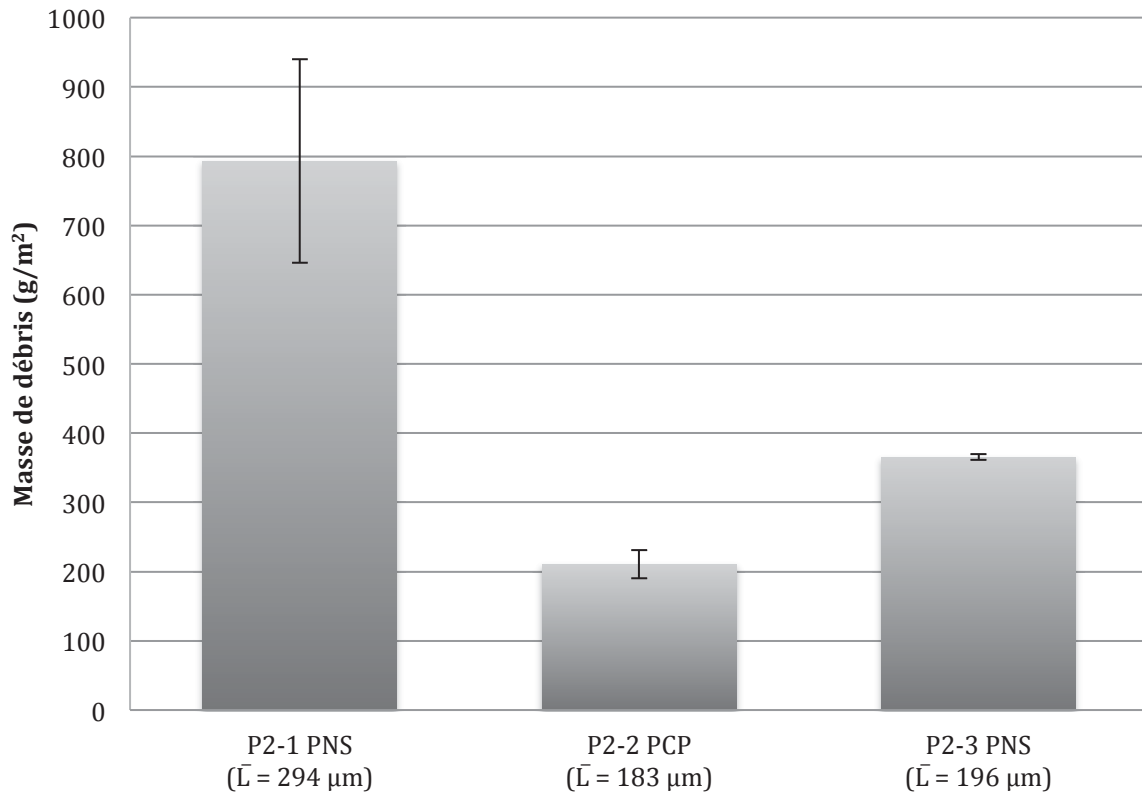


Figure 6-6 Influence du type de superplastifiant sur la résistance à l'écaillage des bétons fabriqués avec le liant C

6.3 Influence du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage en laboratoire

L'objectif de la phase 3 était d'évaluer l'influence d'une variation du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage du béton de type V-S fabriqué avec le liant C. Cette démarche vise à identifier une plage de facteur d'espacement limite qui départage des bétons avec une bonne et une moins bonne résistance à l'écaillage. Une bonne résistance à l'écaillage correspond à une masse de débris à 56 cycles de gel-dégel inférieure à $500 \text{ g}/\text{m}^2$. La Figure 6-7 présente la masse de débris en fonction du facteur d'espacement de huit bétons fabriqués avec le liant C. Ce groupe de béton comprend les 6 bétons de la phase 3 plus un béton de la phase 1 et un béton de la phase 2. Tous ces bétons ont été mûris selon la procédure normalisée de 14 jours humides avec géotextile.

Les résultats de la Figure 6-7 montrent que les cinq bétons avec un facteur d'espacement de $263 \mu\text{m}$ et moins ont une masse de débris très similaire et largement inférieure à la limite de

500 g/m². Les trois bétons avec un facteur d'espacement de 265 µm et plus ont tous une masse débris supérieur à 500 g/m². Ces résultats suggèrent que pour le liant C, il existe un facteur d'espacement limite d'environ 250 à 260 µm au-delà duquel la durabilité à l'écaillage est insuffisante. Pour des facteurs d'espacement supérieur à 260 µm, la masse débris est non seulement plus importante, mais la variabilité entre les éprouvettes A et B est bien plus importante.

Globalement, ces résultats confirment que les bétons de type V-S fabriqués avec le liant C peuvent développer une bonne résistance à l'écaillage. Il est cependant très important de s'assurer que le facteur d'espacement soit suffisamment faible pour bien protéger le béton contre l'écaillage. La valeur maximale semble être d'environ 250 à 260 µm pour le liant C. Comparativement au cas de gel-dégel interne, l'exigence pour le facteur d'espacement est donc plus sévère dans le cas de l'écaillage (250 à 260 µm) que pour la fissuration interne (\bar{L} critique de 340 µm [38]). En pratique, il conviendrait donc de spécifier un facteur d'espacement maximal unique inférieur à 250 µm pour s'assurer d'une bonne durabilité à l'écaillage et à la fissuration interne.

Dans ce contexte, l'exigence réglementaire usuelle de 230 µm maximum pour le facteur d'espacement semble donc applicable dans le cas du liant C.

Les résultats de la Figure 6-7 suggèrent aussi qu'une limite de 500 g/m² semble adéquate comme valeur maximale de la masse de débris des bétons considérés comme possédant une bonne durabilité à l'écaillage. La limite de 500 g/m² de la norme BNQ 2621-905 semble donc applicable et confirmée pour les bétons de type V-S fabriqués avec le liant C.

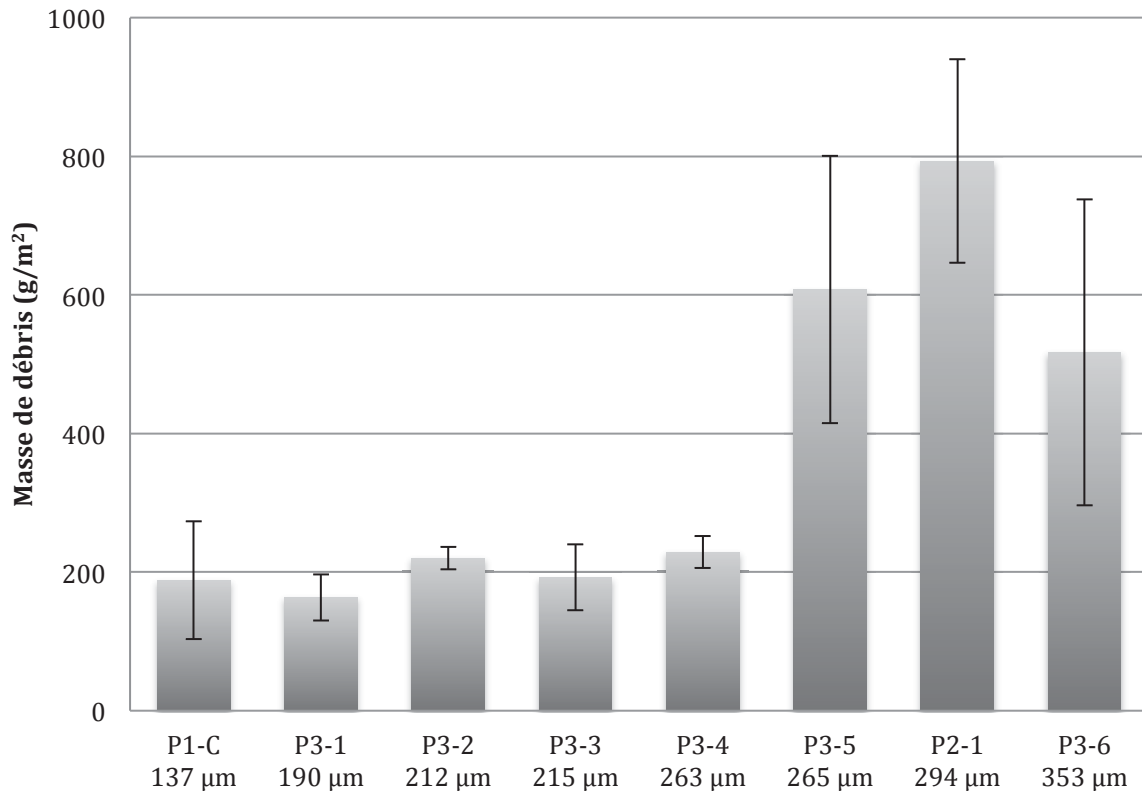


Figure 6-7 Influence du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage de bétons fabriqués avec le liant C

6.4 Influence d'un gros granulat marginal sur la résistance à l'écaillage au laboratoire

L'objectif de la phase 4 est d'évaluer l'influence de l'utilisation d'un granulat marginal sur la résistance à l'écaillage mesurée selon la procédure BNQ 2621-905. Le granulat marginal a donc été utilisé pour fabriquer quatre bétons de type V-S en utilisant le liant C. la Figure 6-8 présente la masse des débris des quatre bétons fabriqués avec le granulat marginal. Les bétons GM-1 et GM-2 ont un facteur d'espacement élevé supérieur à 250 μm et, sans surprise, leur masse des débris dépasse la limite de 500 g/m². Le cas du béton GM-3 est plus singulier puisque malgré un facteur d'espacement faible de 158 μm, la masse des débris est largement supérieure à la limite de 500 g/m². Le béton GM-4 montre une bonne résistance à l'écaillage, qui sur la base des résultats des phases précédentes est normale puisque le facteur d'espacement est relativement faible et inférieur à 250 μm.

Pour pouvoir analyser plus précisément l'effet du granulat marginal, il est nécessaire de comparer sa durabilité à l'écaillage avec celle du granulat de référence. Plusieurs types de comparaisons sont possibles sur la base d'un facteur d'espacement semblable, d'une masse de débris semblable et d'une masse de débris et de facteurs d'espacements semblables. Le Tableau 6-1 a été conçu pour établir et faciliter ces comparaisons.

La première colonne présente le type de comparaison :

1. \bar{L} et masse de débris semblables
2. \bar{L} semblables
3. Masse de débris semblables

La deuxième colonne indique les bétons choisis pour établir une comparaison donnée. Tous les bétons du Tableau 6-1 ont été fabriqués avec le liant C et le superplastifiant de type PNS. La troisième colonne indique le facteur d'espacement. La quatrième colonne indique le type de granulat choisi (référence et marginal pour chaque comparaison). La cinquième colonne présente les masses des débris à 56 cycles. Les quatre dernières colonnes indiquent la surface totale des « pop-outs » exprimée en pourcentage de la surface totale et le nombre de « pop-outs ». Ces valeurs ont été calculées selon la procédure développée et présentée dans la section 4.4.3 de ce rapport.

La Figure 6-9 présente les masses de débris obtenues avec le granulat marginal et le granulat de référence pour les trois types de comparaisons décrites au Tableau 6-1. Les bétons P3-4 et GM-4 possèdent des \bar{L} semblables (263 μm et 223 μm) et une masse des débris dans la plage de 200 à 400 g/m^2 . On constate cependant que c'est le granulat marginal qui engendre la plus forte masse des débris.

Les bétons P3-6 et GM-2 ont des facteurs d'espacement très similaires de 353 et 334 μm . À nouveau, on remarque que c'est le granulat marginal qui produit la masse des débris la plus élevée avec une valeur qui atteint 800 g/m^2 alors que celle du granulat de référence (517 g/m^2) est tout juste au-dessus de la limite de 500 g/m^2 .

Les bétons P2-1 et GM-3 ont des masses de débris voisines (800 – 950 g/m²). C'est encore avec le granulat marginal que la plus grande masse de débris a été obtenue. Le granulat marginal semble avoir un effet défavorable puisque malgré un facteur d'espacement faible (158 µm) la masse des débris est très élevée. Ces résultats suggèrent qu'une proportion relativement importante de la masse totale des débris pourrait provenir non pas uniquement d'un endommagement (écaillage) du mortier, mais plutôt de l'endommagement des particules du gros granulat (« pop-outs »). En effet, le réseau de bulles d'air peut offrir une protection pour la pâte et le mortier, mais il ne peut pas offrir une protection contre l'éclatement de la structure interne du minéral de la particule du gros granulat marginal. Une plus grande quantité de « pop-out » pourrait donc expliquer la moins bonne résistance à l'écaillage obtenue avec le granulat marginal. L'analyse du nombre et des surfaces totales de « pop-outs » est nécessaire pour évaluer cette hypothèse.

La Figure 6-10 présente la surface des gros granulats éclatés en fonction du type de gros granulat et pour chacune des comparaisons choisies précédemment. Les bétons P3-4 et GM-4 possèdent des facteurs d'espacement similaires, mais on a montré que la masse des débris du béton GM-4 est plus élevée.

Les résultats de la Figure 6-10 suggèrent que cette masse de débris plus élevée découle en partie d'une plus grande quantité de granulat éclatés puisque ce granulat présente une surface éclatée de 2,5 % comparativement à 1,5% pour le granulat de référence.

La même tendance s'observe aussi dans le cas des bétons P3-6 et GM-2 pour lesquels la surface éclatée mesurée avec le granulat marginal (GM-2 4,0%) est nettement supérieure à celle du granulat de référence (P3-6 1,6%). Une plus grande quantité de granulats éclatés (« pop-outs ») avec le granulat marginal pourrait donc expliquer pourquoi la masse des débris obtenue avec ce granulat (800 g/m²) est bien supérieure à celle obtenue avec le granulat de référence (517 g/m²) malgré les facteurs d'espacement presque identiques pour les deux bétons (353 et 334 µm).

La comparaison des bétons P2-1 et GM-3 confirme l'hypothèse de la plus grande proportion de gros granulats éclatés avec le granulat marginal. En effet, deux bétons ont des masses de débris similaires (800 à 900 g/m²). Dans le cas du granulat marginal, cette masse de débris élevée a été obtenue avec un \bar{L} de seulement 158 μm . de la Figure 6-10 montre que dans ce cas, la surface éclatée est élevée à 3,5% on peut donc conclure que la résistance à l'écaillage déficiente du béton GM-3 découle principalement d'une forte quantité d'éclatement (« pop-outs ») et non pas d'une protection insuffisante de la pâte, puisque le \bar{L} est de 158 μm .

La Figure 6-11 présente le nombre d'éclatements de granulat par éprouvette d'écaillage en fonction du type de gros granulat et des trois comparaisons choisies. Les résultats de cette figure confirment ceux de la figure précédente (6-10). En effet, pour les trois comparaisons choisies, le nombre d'éclatements obtenu avec le granulat marginal est systématiquement supérieur à celui obtenu avec le granulat de référence,

Ces résultats appuient les conclusions précédentes à l'effet que le granulat marginal est plus sensible à l'écaillage et que l'éclatement des particules lors du test d'écaillage est en partie responsable des plus grandes masses de débris obtenues avec ce type de gros granulats.

Globalement, les résultats de la phase 4 suggèrent qu'il existe une relation entre les résultats du test micro-Deval d'un gros granulat et la durabilité à l'écaillage d'un béton de type V-S fabriqués avec ce gros granulat. En effet, des essais d'écaillage réalisés avec la procédure BNQ 2621-905 ont montré qu'un gros granulat dont le micro-Deval est de 18% et qui est proche des limites de 17% ou 19% (CSA A23.1) se révèle effectivement moins durable à l'écaillage.

Cette durabilité plus faible est non seulement observée avec un facteur d'espacement élevé (334 μm), mais aussi avec un facteur d'espacement faible (158 μm). Il faut cependant souligner que cette relation entre le micro-Deval et l'écaillage n'est pas encore suffisamment bien comprise pour pouvoir fixer une limite maximale précise pour la valeur du micro-Deval d'un granulat utilisé dans un béton sévèrement exposé à l'écaillage. Par exemple, le béton

GM-4, fabriqué avec le gros granulat marginal montre une résistance à l'écaillage acceptable avec un facteur d'espacement de 223 μm .

Une étude plus vaste de la corrélation entre le micro-Deval et la durabilité à l'écaillage devrait être entreprise pour pouvoir déterminer s'il pourrait être utile de fixer une limite maximale du micro-Deval d'un gros granulat exposé à l'écaillage. Cette étude devrait notamment porter sur un échantillonnage vaste et représentatif des sources de gros granulats disponibles.

En attendant, si la valeur de la perte au micro-Deval d'un gros granulat s'approche des limites maximales actuelles (CSA A23.1 (17 % ou 19 %)), il serait recommandé de vérifier sa performance au test d'écaillage avant de l'utiliser dans un béton sévèrement exposée au sels de déglacage.

Le résultat de l'essai de gel-dégel non confiné ne semble pas bien corrélé avec la durabilité à l'écaillage et notamment avec l'endommagement crée par l'éclatement des granulats lors de l'essai d'écaillage. En effet, le granulat marginal utilisé engendre clairement un écaillage plus sévère alors que sa perte au gel-dégel conforme de 4 % est nettement inférieure aux valeurs limite de 6 % ou 9 % de la norme CSA A23.1. Il y aurait lieu de poursuivre des recherches afin de préciser l'impact de la résistance au gel-dégel non confiné des granulats sur la résistance à l'écaillage du béton.

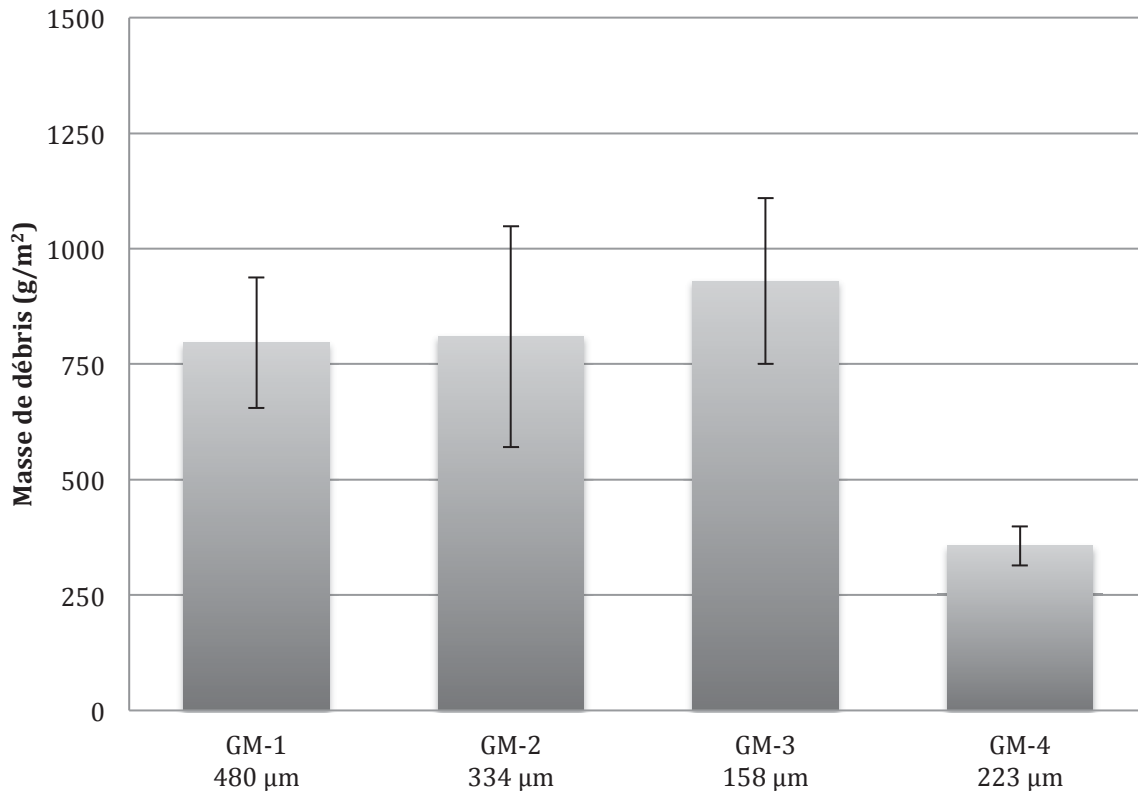


Figure 6-8 Influence d'un gros granulat marginal et du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage du béton fabriqué avec le liant C

Tableau 6-1 Quantités et pourcentage de surface de « pop out » pour six mélanges

Type de comparaisons	Bétons	\bar{L} (µm)	Granulat	Masse de débris (g/m ²)		Surface de pop out (%)		Nombre de pop out	
\bar{L} et masse de débris semblable	P3-4 #1	263	Référence	252	229	1,4	1,5	92	99
	P3-4 #2			206		1,6		105	
	GM-4 #1	223	Marginal	399	357	2,7	2,4	133	141
	GM-4 #2			314		2,1		148	
\bar{L} semblable	P3-6 #1	353	Référence	738	517	1,9	1,6	63	68
	P3-6 #2			296		1,2		73	
	GM-2 #1	334	Marginal	570	810	4,4	4,0	133	141
	GM-2 #2			1049		3,6		148	
Masse de débris semblable	P2-1 #1	294	Référence	940	793	1,1	1,3	64	66
	P2-1 #2			646		1,4		68	
	GM-3 #1	158	Marginal	1109	929	4,2	3,5	154	132
	GM-3 #2			750		2,8		109	

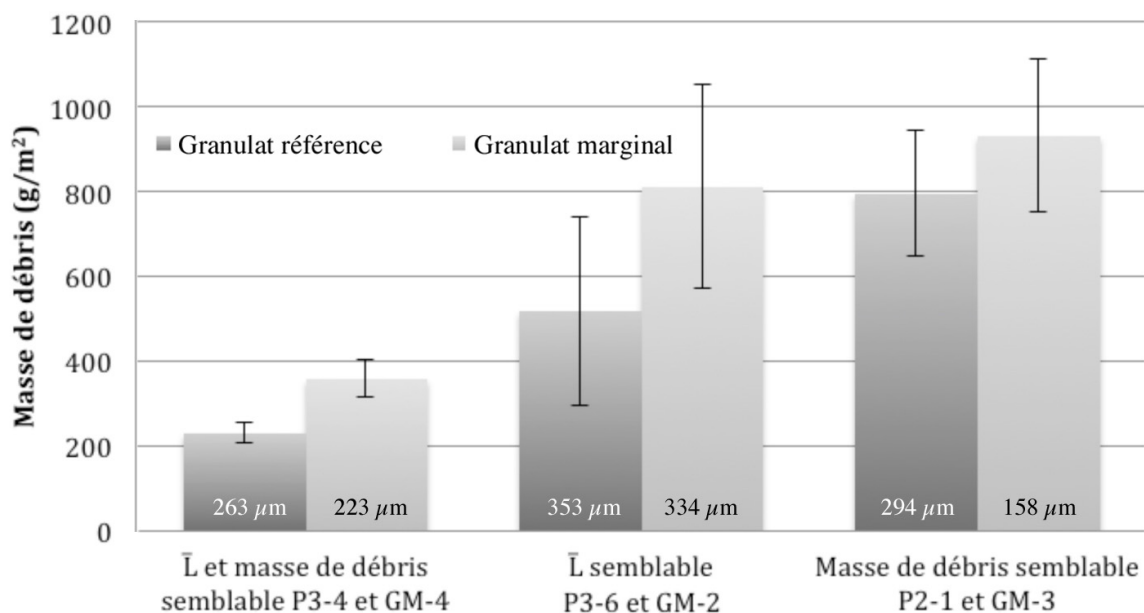


Figure 6-9 Influence du gros granulat marginal sur la masse de débris en fonction de trois types de comparaisons par rapport au granulat de référence

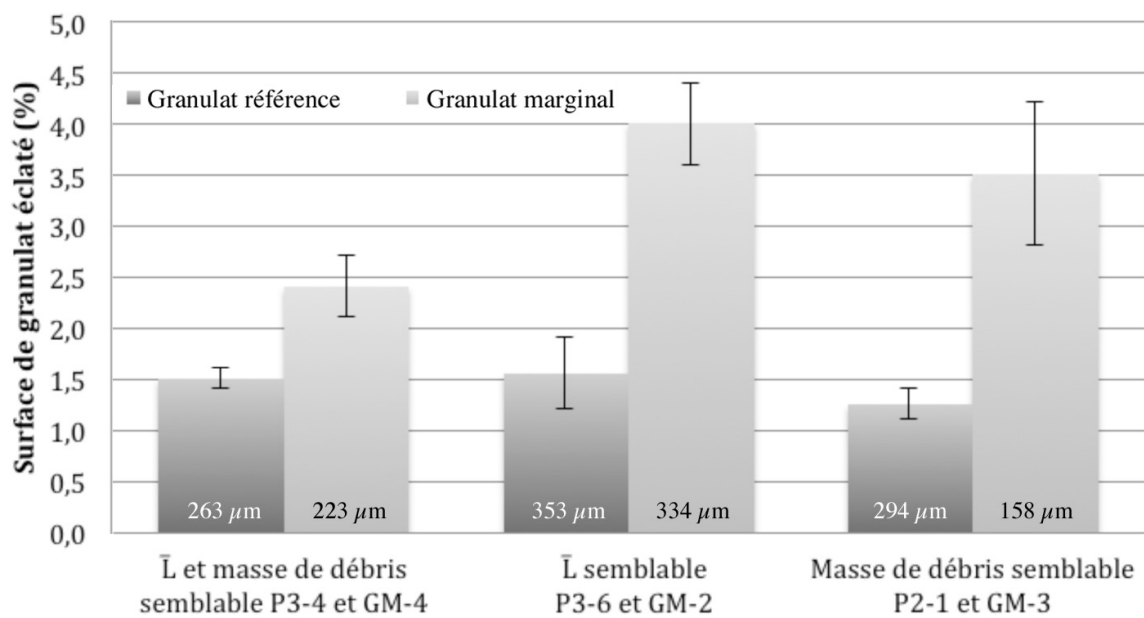


Figure 6-10 Comparaisons des surfaces de granulats éclatés lors de l'écaillage pour les deux granulats

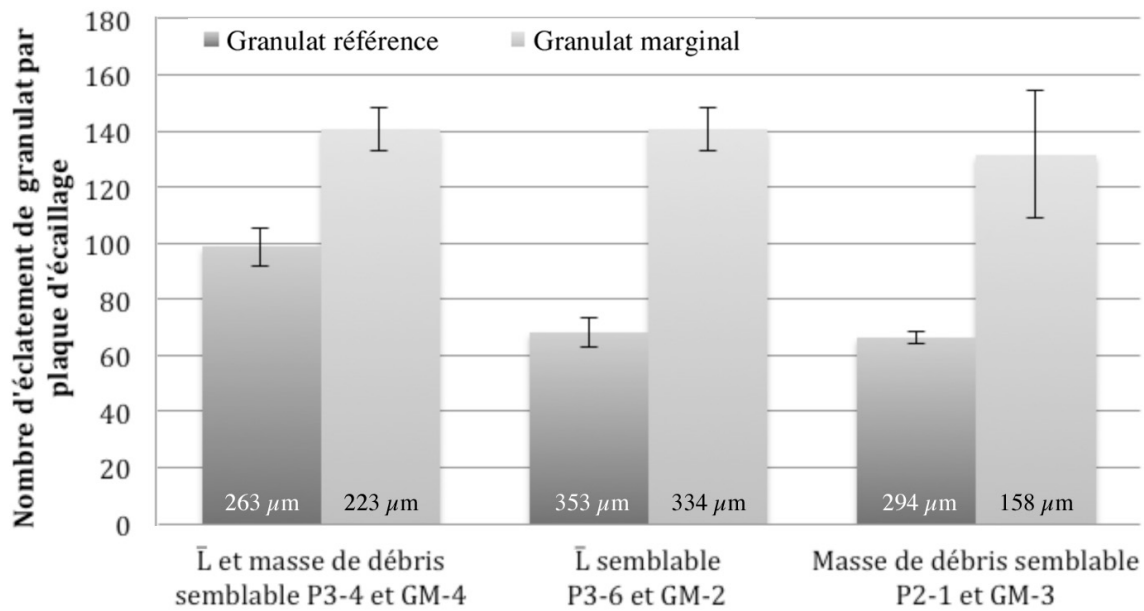


Figure 6-11 Comparaisons de la quantité de granulats éclatés par plaque d'écaillage pour les deux granulats

CHAPITRE 7 Conclusions

Ce projet de recherche a permis de mieux comprendre la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec des liants ternaires disponibles au Québec. Les résultats ont notamment permis de comprendre l'influence de certains paramètres de formulation dont : le type de liant, les caractéristiques du réseau de bulles d'air, le type de superplastifiant et le type de gros granulat. On comprend aussi l'influence de certains paramètres expérimentaux associée à la procédure d'essai accélérée en laboratoire dont notamment le rôle du géotextile en fond de moule, la durée du mûrissement humide et l'effet d'un produit de cure chimique.

Cette recherche a démontré que la durabilité à l'écaillage d'un béton de type V-S, fabriqué avec un liant ternaire, peut être conforme à l'exigence de performance de 500 g/m^2 spécifiée dans la norme BNQ 2621-905. En laboratoire, il est tout à fait possible de satisfaire ce critère de performance en utilisant les liants A (GUb-F/SF), et C (Gub-S/SF) pour produire des bétons fabriqués avec un rapport E/L de 0,40 et avec un dosage en liant de 380 à 390 kg/m^3 . Ces mêmes paramètres de formulations utilisés avec le liant B (Gub-F/SF) n'ont cependant pas permis de produire des bétons durables à l'écaillage selon la procédure d'essais BNQ 2621-905.

Ces résultats démontrent que la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec un liant ternaire est fonction des caractéristiques physico-chimiques spécifiques du liant (finesse, teneur en C_3S et C_2S , type d'ajout cimentaire, teneur en ajout cimentaire, etc.). Chaque liant doit donc faire l'objet d'une caractérisation particulière de sa durabilité à l'écaillage. Il faut noter que la durabilité à l'écaillage obtenue avec le liant B pourrait être améliorée en utilisant un rapport E/L plus faible que 0,40 et un dosage en liant plus élevé que 390 kg/m^3 .

La procédure actuelle BNQ 2621-905, qui comporte une période de mûrissement humide de 14 jours, est adéquate pour caractériser la performance à l'écaillage des bétons de type V-S fabriqués avec des liants ternaires. La limite actuelle maximale de 500 g/m^2 pour la masse des débris à 56 jours permet de bien départager les bétons durables des bétons non durables.

Selon cette procédure, un facteur d'espacement des bulles d'air inférieur à 250 μm est requis pour obtenir une durabilité conforme pour le cas d'un béton de type V-S fabriqué avec les liants ternaires A et C. Un béton de type V-S fabriqué avec le liant ternaire B ($E/L=0,40$, 390 kg de liant/ m^3) n'est pas durable à l'écaillage même avec un facteur d'espacement aussi faible que 110 μm .

L'utilisation d'un géotextile en fond de moule (tel qu'exigé dans la procédure BNQ 2621-905 annexe B) pourrait être retirée des versions subséquentes de cette procédure d'essais. La présence ou l'absence de ce géotextile n'a que très peu d'effet sur le résultat du test et ce tant pour les valeurs élevées ou faibles de la masse débris.

Le prolongement de la période de cure humide jusqu'à 28 ou 56 jours ne permet pas d'améliorer la résistance à l'écaillage des bétons avec liants ternaires testés. L'hypothèse à l'effet qu'une cure prolongée pourrait permettre une meilleure hydratation de l'ajout cimentaire et une évolution plus rationnelle de leur durabilité à l'écaillage n'est donc pas vérifiée. Les résultats montrent que la durée de mûrissement humide de 56 jours est même défavorable à la durabilité à l'écaillage de certains liants ternaires. Une étude microstructurale serait utile afin de pouvoir expliquer cet effet.

En laboratoire, l'influence du produit de cure (cure chimique) sur la résistance à l'écaillage dépend fortement du type de liant utilisé. Ce type de mûrissement a un effet très défavorable pour les liants A et C et il ne doit donc pas remplacer la cure humide de 14 jours prévue pour les tests en laboratoire. Le liant B se démarque des deux autres liants ternaires, car c'est le seul pour lequel la cure chimique améliore la durabilité à l'écaillage. Dans ce cas, même si la cure chimique est favorable, elle ne conduit cependant pas à une durabilité à l'écaillage satisfaisante. Une étude microstructurale serait nécessaire pour pouvoir comprendre l'influence du produit de cure sur la durabilité à l'écaillage.

Pour un facteur d'espacement donné, le type de superplastifiant (polynaphtalène ou polycarboxylate) n'a pas d'effet sur la résistance à l'écaillage des bétons de type V-S fabriqués

avec le liant C. Quel que soit le type de superplastifiant, c'est essentiellement le facteur d'espacement qui est le principal paramètre contrôlant la durabilité à l'écaillage de ces bétons.

Il existe une relation entre la perte à l'essai micro-Deval et la résistance à l'écaillage d'un béton de type V-S fabriqué avec ce granulats. Le gros granulats dont la perte au micro-Deval de 18% était proche de la limite de 17% (ou 19%) s'est relevé moins durable à l'écaillage que le granulats de référence ayant une perte moyenne de 9,8%. La relation entre la perte micro-Deval et la résistance à l'écaillage n'est pas encore suffisamment bien comprise, en plus d'être basé sur seulement deux valeurs de micro-Deval, pour pouvoir fixer une limite maximale pour la valeur micro-Deval d'un granulats utilisé dans un béton exposé à l'écaillage. Une étude plus approfondie de la corrélation entre la perte micro-Deval et la durabilité à l'écaillage devrait être entreprise pour pouvoir caractériser davantage de sources granulaires et pour définir une éventuelle exigence normalisée. D'ici là, la durabilité à l'écaillage du béton fabriqué avec un gros granulats possédant une perte micro-Deval élevé devrait être vérifiée en laboratoire avant d'autoriser son utilisation dans un environnement comportant des sels de déglacages.

Basé sur les deux essais réalisés, l'essai de gel-dégel non confiné ne semble pas bien corrélé avec la durabilité à l'écaillage et notamment avec l'endommagement crée par l'éclatement des gros granulats lors du test d'écaillage.

Ce projet de recherche permet d'identifier des travaux futurs pour préciser davantage certaines composantes de la durabilité à l'écaillage des bétons fabriqués avec des liants ternaires :

- Il serait utile d'étudier la résistance à l'écaillage d'autres types de bétons fabriqués avec des liants ternaires, tels que les bétons autoplacants et les bétons à haute performance.
- Il faudrait poursuivre l'étude de la corrélation entre la perte micro-Deval et la durabilité à l'écaillage, notamment en testant un plus large éventail de sources granulaires disponibles au Québec.
- Il faudrait étudier de manière plus fondamentale la microstructure de surface des bétons avec liant ternaires pour tenter de mieux comprendre l'influence du type de cure sur leur durabilité à l'écaillage.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] G. Fagerlund, “Effect of air-entraining and other admixtures on the salt-scaling resistance of concrete,” in *J. International Seminar on “Some Aspects of Admixtures and Industrial By-Products on the Durability of Concrete,”* 1986.
- [2] R. Gagné and 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.
- [3] T. C. Powers, “The air requirement of frost resistant concrete,” *Highw. Res. Board*, vol. 29, pp. 184–211, 1949.
- [4] M. Pigeon and R. Pleau, *Durability of concrete in cold climates, Modern concrete technology 4*. London: E & FN Spon, 1995.
- [5] T. C. Powers and R. A. Helmuth, “Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing,” *Highw. Res. board*, vol. 32, pp. 285–297, 1953.
- [6] T. C. Powers, “Freezing effects in concrete,” *ACI Spec. Publ.*, vol. 47, pp. 1–11, 1975.
- [7] M. Pigeon, R. Gagné, P.-C. Aïtcin, and M. Langlois, “La durabilité au gel des bétons à hautes performances,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 19, pp. 975–980, 1992.
- [8] A. Rösli, “Temperaturmessungen in Strassenbelägen, Versuche mit Tausalz, Winter 1975-1976 und 1976-1977.” 1977.
- [9] A. B. Harnik, U. Meier, and A. Rösli, “Combined influence of freezing and deicing salt on concrete---Physical aspects,” *Durab. Build. Mater. components*, vol. STP 691, pp. 474–484, 1980.
- [10] A. Rösli and A. B. Harnik, “Improving the durability of concrete to freezing and deicing salts,” *Durab. Build. Mater. Components. ASTM Spec. Tech. Publ. STP-691, ASTM, Philadelphia*, pp. 464–473, 1980.
- [11] J. J. Valenza and G. W. Scherer, “Mechanism for Salt Scaling,,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, no. 4, pp. 1161–1179, 2006.
- [12] CSA, “CSA A23.2-22C Calcul de la résistance à l’écaillage des surfaces de béton exposées à des produit chimiques de déglçage utilisant la perte de masse,” in *CSA A23.2*, 2014.
- [13] BNQ, “Détermination de la résistance à l’écaillage du béton soumis à des cycles de gel-dégel en contact avec des sels de déglçage,” *BNQ 2621-905*, p. 5, 2012.
- [14] ASTM, “Standard Test Method for,” in *C672/C672M WK9367 Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*, 2011, p. 3.

- [15] R. Gagné, “Note de cours durabilité et réparation du béton.” Université de Sherbrooke, 2014.
- [16] J. Marchand, M. Pigeon, D. Bager, and C. Talbot, “Influence of chloride solution concentration on deicer salt scaling deterioration of concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 96, no. 4, pp. 429–435, Aug. 1999.
- [17] J.-P. Ollivier and A. Vichot, *La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. 2008.
- [18] R. Gagné and J. Marchand, “La résistance à l’écailage des bétons à haute performance: état de la question,” in *Comptes rendus de l’Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants*, 1993, pp. 21–48.
- [19] R. Bleszynski, R. D. Hooton, M. D. A. Thomas, and C. A. Rogers, “Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag: Laboratory and outdoor exposure site studies,” *ACI Mater. J.*, vol. 99, no. 5, pp. 499–508, Oct. 2002.
- [20] M. Radlinski, J. Olek, and T. Nantung, “Effect of Mixture Composition and Initial Curing Conditions on Scaling Resistance of Ternary (OPC/FA/SF) Concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 10, p. 668, 2008.
- [21] S. Khatibmasjedi, “Insights into the mechanisms of salt scaling of high volume fly ash concrete,” Oklahoma State University, 2014.
- [22] D. K. Panesar, “Freeze-thaw de-icer salt scaling resistance of concrete containing GGBFS,” McMaster University, 2007.
- [23] I. Afrani and C. Rogers, “The effects of different cementing materials and curing on concrete scaling,” *Cem. Concr. Aggregates*, vol. 16, no. 2, pp. 132–139, 1994.
- [24] S. E. Chidiac and D. K. Panesar, “Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 2, pp. 63–71, 2008.
- [25] I. K. Battaglia, J. F. Munoz, and S. M. Cramer, “Proposed Behavioral Model for Deicer Scaling Resistance of Slag Cement Concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 4, p. 361, 2010.
- [26] A. Boyd and R. Hooton, “Long-Term Scaling Performance of Concretes Containing Supplementary Cementing Materials,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 10, pp. 820–825, 2007.
- [27] M. Jolin, R. D. Hooton, A. Bilodeau, R. Gagné, N. Bouzoubaâ, and B. Fournier, “Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: laboratory and field test data,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 35, no. 11, pp. 1261–1275, 2008.

- [28] M. Pigeon, C. Talbot, J. Marchand, and H. Hornain, "Surface microstructure and scaling resistance of concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 10, pp. 1555–1566, 1996.
- [29] R. M. Ahani and M. R. Nokken, "Salt scaling resistance--the effect of curing and pre-saturation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, p. 558, 2012.
- [30] MTQ, "TOME VII Matériaux chapitre 3: bétons de masse volumique normale," Collection Normes Ouvrages routiers, 2014, p. 11.
- [31] MTO, "LS-412 Method of Test for Scaling Resistance of Concrete Surfaces," no. 17, p. 5, 2012.
- [32] A. canadienne de Normalisation, "CSA A23.2-29A Méthode d'essai pour déterminer la résistance à la dégradation des gros granulats par abrasion dans l'appareil micro-Deval," in *Béton : Constituants et exécution des travaux/Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton*, 2014, p. 5.
- [33] ASTM, "ASTM C192 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," 2015, p. 8.
- [34] R. J. Nkinambubanzi, P.-C., Mantellato, S., Flatt, "Superplasticizers in practice (chapitre 16)," in *Science and technology of concrete admixtures*, P.-C. Aïtcin and R. J. Flatt, Eds. 2016, p. 371.
- [35] K. MacDonald, "Polycarboxylate Ether and Slabs - Understanding How They Work in Floor Construction," *Concrete Construction*, Sep-2009.
- [36] C. Eickschen, E.;Müller, "Interactions of air-entraining agents and plasticizers in concrete," *Cem. Int.* 2, pp. 88–101, 2013.
- [37] L. L. Kuo, "Defoamers for hydratable cementitious compositions," 8,187,376, 2012.
- [38] R. Bouchard, "Durabilité aux cycles de gel-dégel de bétons fabriqués avec des liants binaires et ternaires," Université de Sherbrooke, 2016.

ANNEXE A RÉSULTATS DÉTAILLÉS

A.1 Essais sur les granulats

A.1.1 Micro-Deval

Tableau A-1 Détails des résultats au micro-Deval pour le granulat étalon

Fraction granulométrique (mm)	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Perte (%)
Étalon 10-20	1500,4	1291,1	13,9%
Étalon 5-14	1501,4	1249,7	16,8%
Perte moyenne			15,4%
<i>Intervalle de référence [11,4% ; 14,8%]</i>			

Tableau A-2 - Détails des résultats au micro-Deval pour le granulat marginal

Fraction granulométrique (mm)	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Perte (%)
Marginal 10-20	1499,8	1261,5	15,9%
Marginal 5-14	1499,5	1259,8	16,0%
Perte moyenne			16,0%

Tableau A-3 - Détails des résultats au micro-Deval pour le granulat marginal le granulat de référence

Fraction granulométrique (mm)	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Perte (%)
Référence 10-20	1499,1	1389,6	7,3%
Référence 5-14	1495,4	1384,8	7,4%
Perte moyenne			7,4%

A.1.1 Gel-dégel non confiné

Tableau A-4 - Détails des résultats au gel-dégel pour le granulat étalon

Fraction	Masse initiale (g)	Masse après cycles (g)	Pertes	Refus	Perte de masse moyenne pondérée
14-20mm	1251,5	1178,4	5,8%	49,7%	2,9%
10-14mm	1001,0	876,7	12,4%	28,4%	3,5%
5-10mm	499,7	408,5	18,3%	17,4%	3,2%
Total					9,6%

Tableau A-5 - Détails des résultats au gel-dégel pour le granulat marginal

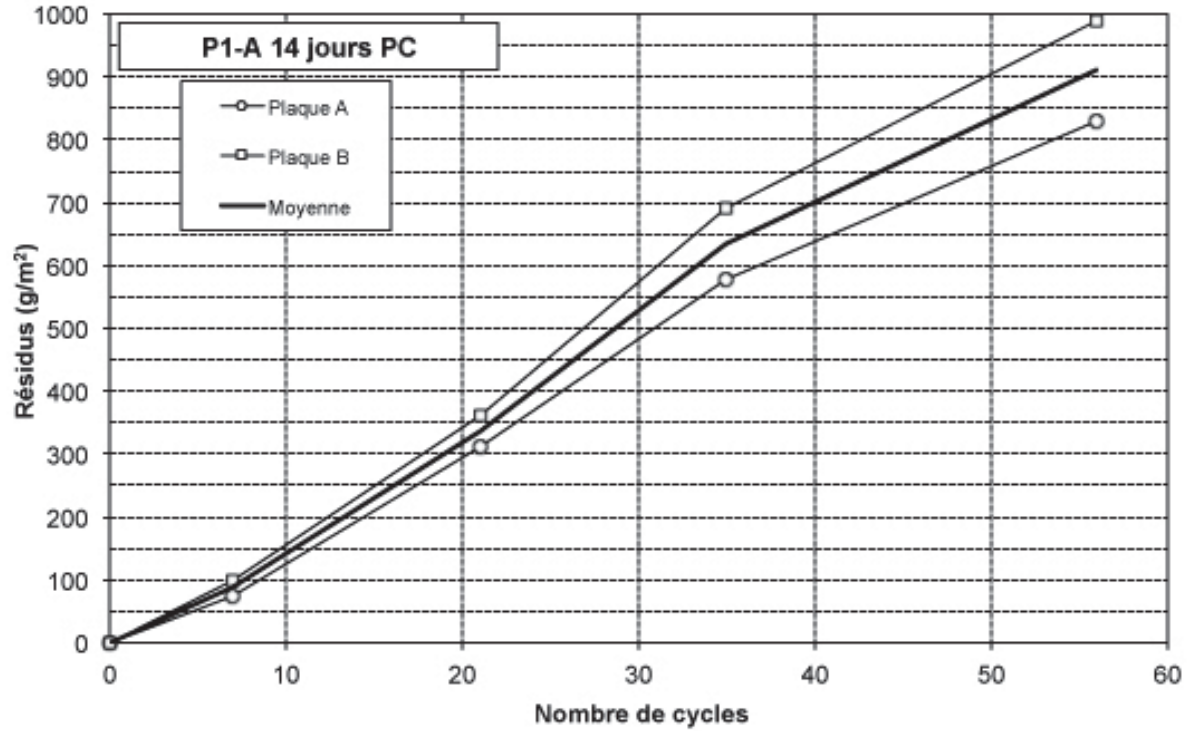
Fraction	Masse initiale (g)	Masse après cycles (g)	Pertes	Refus	Perte de masse moyenne pondérée
14-20mm	1249,6	1201,8	3,8%	34,0%	1,30%
10-14mm	1002,2	935,6	6,7%	28,0%	1,9%
5-10mm	500,6	490,2	2,1%	38,0%	0,8%
				Total	4,0%

Tableau A-6 - Détails des résultats au gel-dégel pour le granulat référence

Fraction	Masse initiale (g)	Masse après cycles (g)	Pertes	Refus	Perte de masse moyenne pondérée
14-20mm	1250,6	1204,9	3,7%	30%	1,1%
10-14mm	999,7	946,6	5,3%	27%	1,5%
5-10mm	500,2	470,6	5,9%	43%	2,5%
				Total	5,1%

A.2 Résultats détaillés de la phase 1

A.2.1 Résultats à l'écaillage du liant A



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	23-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	30-juin-15	76	99	87	1a	1a	1a	101,2	101,3	101,3
21	14-juil.-15	311	360	336	1a	1a	1a	101,3	101,4	101,3
35	28-juil.-15	578	692	635	1a	1a	1a	101,2	101,2	101,2
56	18-août-15	829	990	910	1b	1b	1a	101,2	101,2	101,2

Figure A-1 - Résultats du test d'écaillage P1-A 14 jours PC



P1-A 14 jours PC Plaque A



P1-A 14 jours PC Plaque B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours sans géotextile au fond du moule de plaque d'écaillage avec une cure en chambre humide de 14 jours sont présentés sur la Figure A-2.

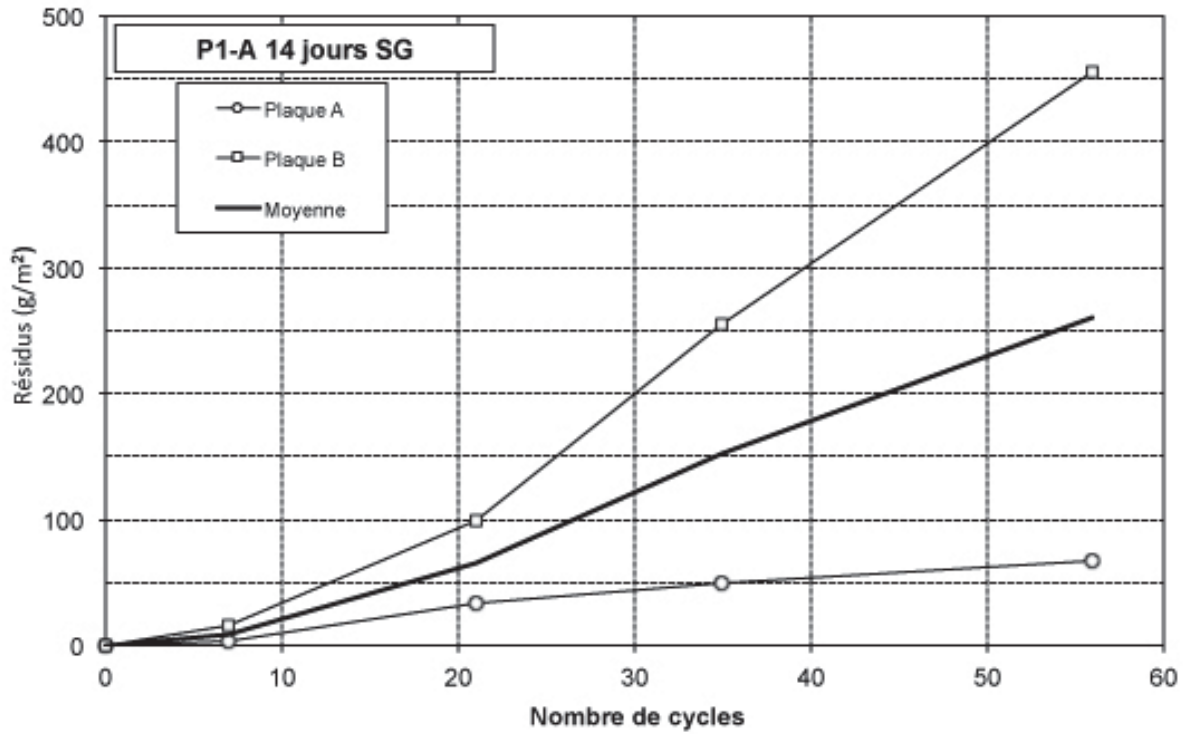


Figure A-2 - Résultats du test d'écaillage P1-A 14 jours SG

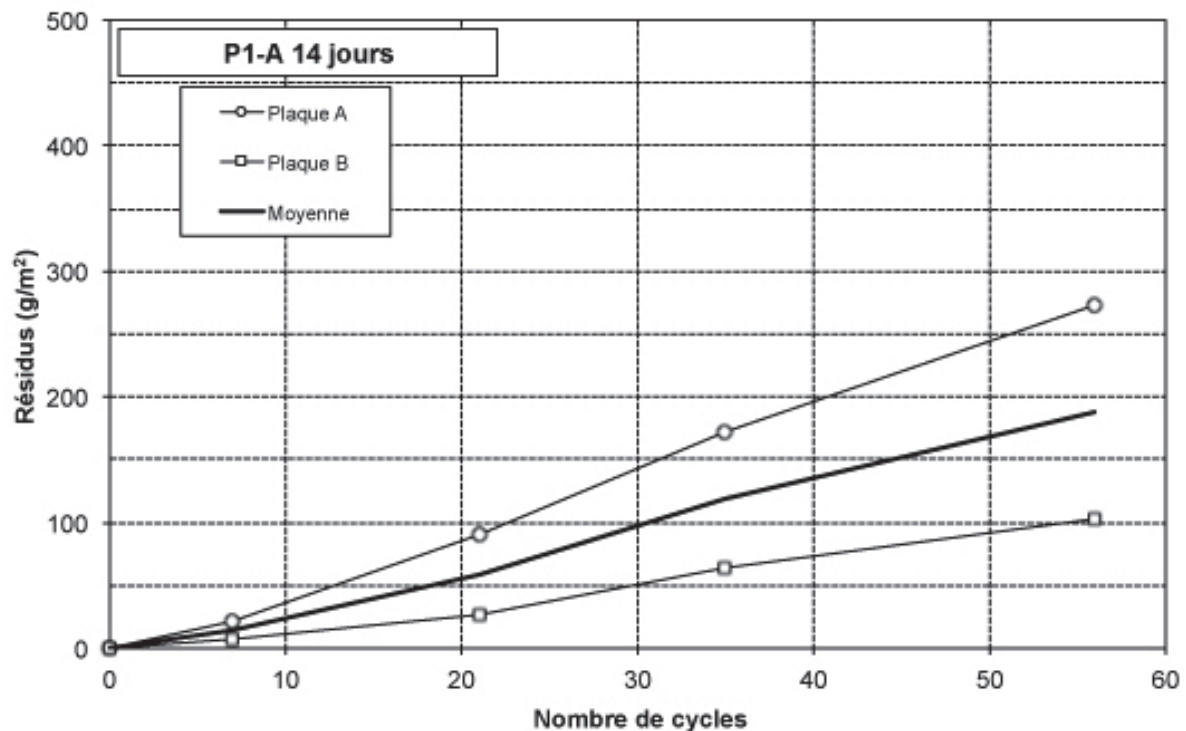


P1-A 14 jours SG Plaque A



P1-A 14 jours SG Plaque B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours selon la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-3.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	23-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	30-juin-15	21	8	15	1a	1a	1a	100,6	100,7	100,6
21	14-juil.-15	91	27	59	1a	1a	1a	100,6	100,7	100,7
35	28-juil.-15	172	64	118	1a	1a	1a	100,6	100,7	100,7
56	18-août-15	273	103	188	1a	1a	1a	100,6	100,8	100,7

Figure A-3 - Résultats du test d'écaillage P1-A 14 jours



P1-A 14 jours Plaque A



P1-A 14 jours Plaque B

Les résultats avec un mûrissement en chambre humide de 28 jours au lieu des 14 jours prescrits dans la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-4.

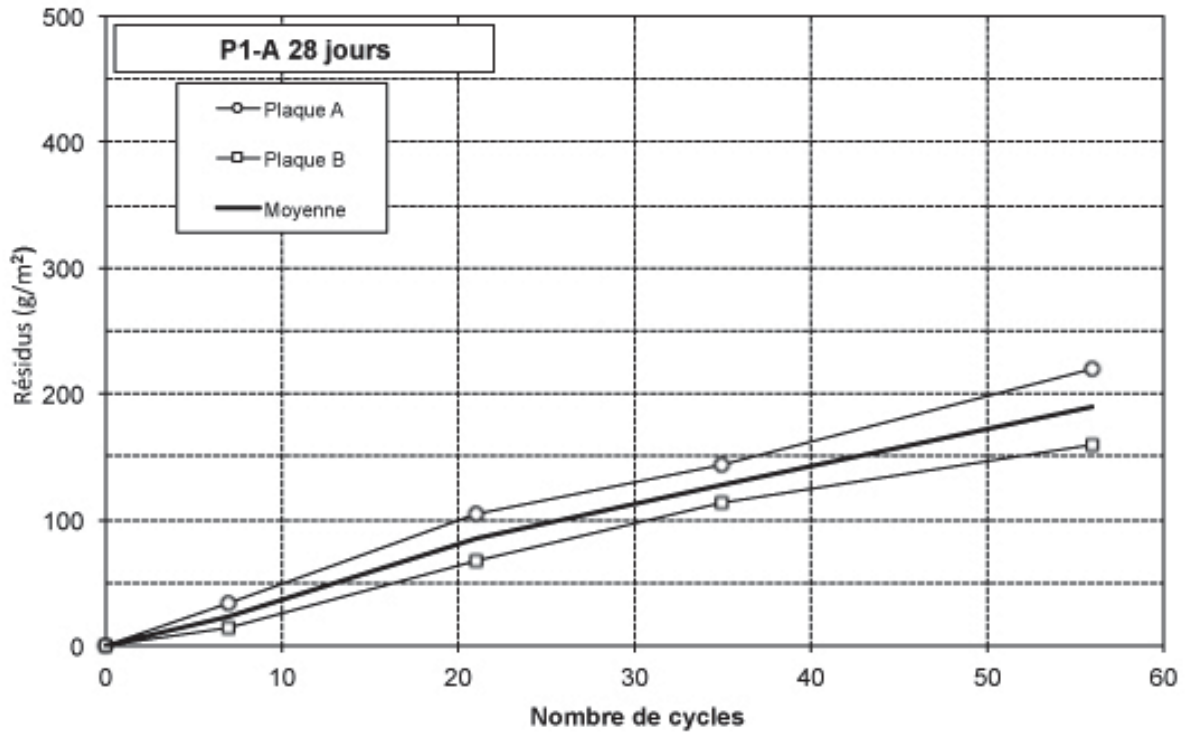
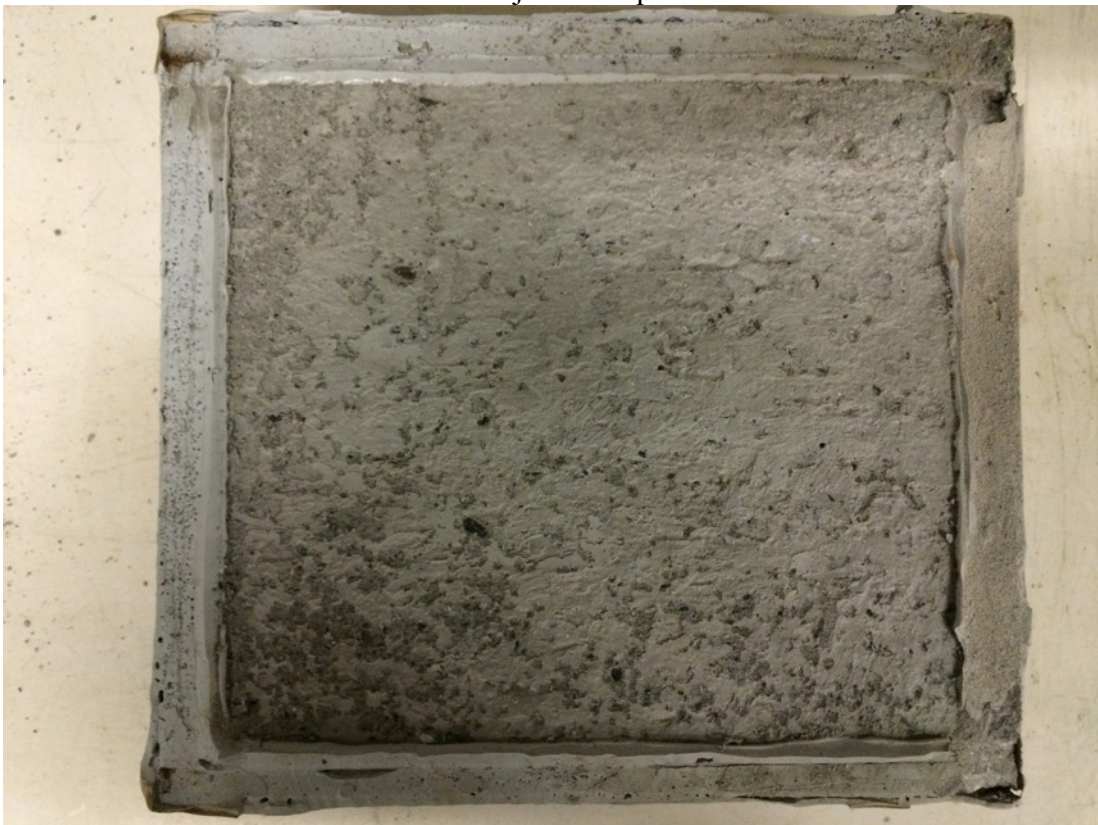


Figure A-4 - Résultats du test d'écaillage P1-A 28 jours

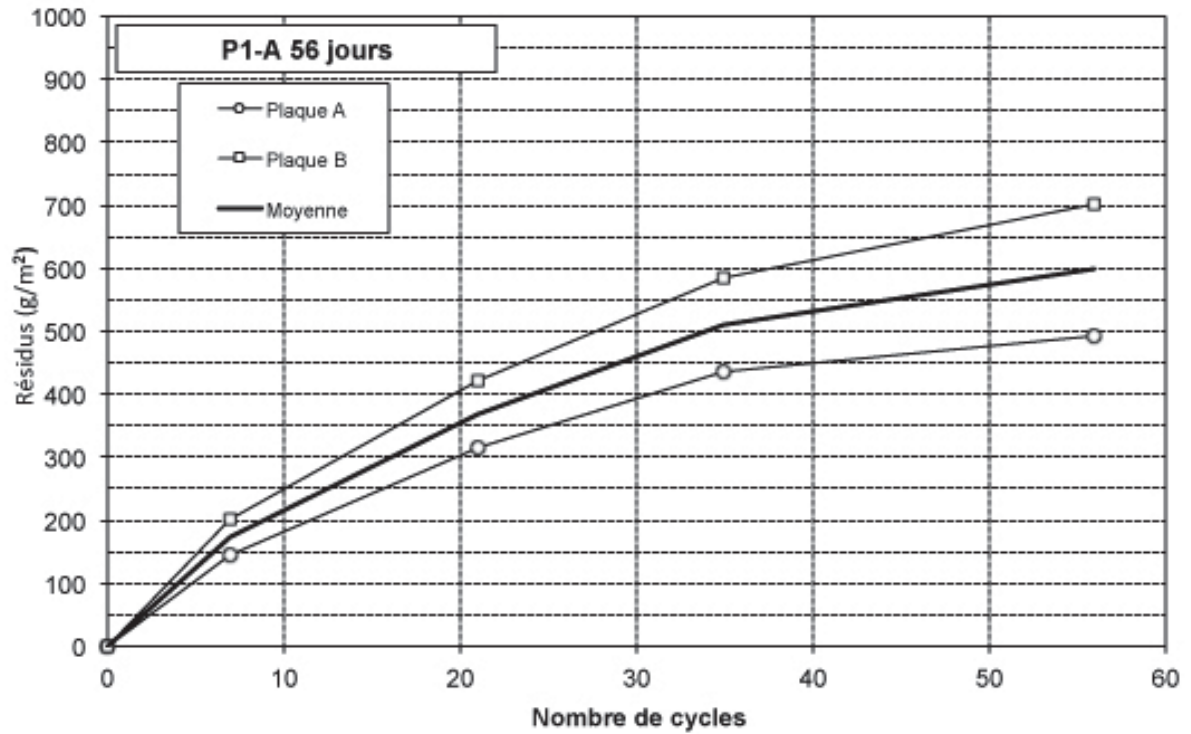


P1-A 28 jours Plaque A



P1-A 28 jours SG Plaque B

Les résultats avec un mûrissement en chambre humide de 56 jours au lieu des 14 jours prescrits dans la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-5.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	4-août-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	11-août-15	146	204	175	1a	1a	1a	100,5	100,4	100,4
21	25-août-15	315	422	369	1a	1a	1a	100,4	100,4	100,4
35	8-sept-15	438	586	512	1a	1a	1a	100,3	100,3	100,3
56	29-sept-15	493	703	598	1a	1a	1a	100,3	100,3	100,3

Figure A-5 - Résultats du test d'écaillage P1-A 56 jours



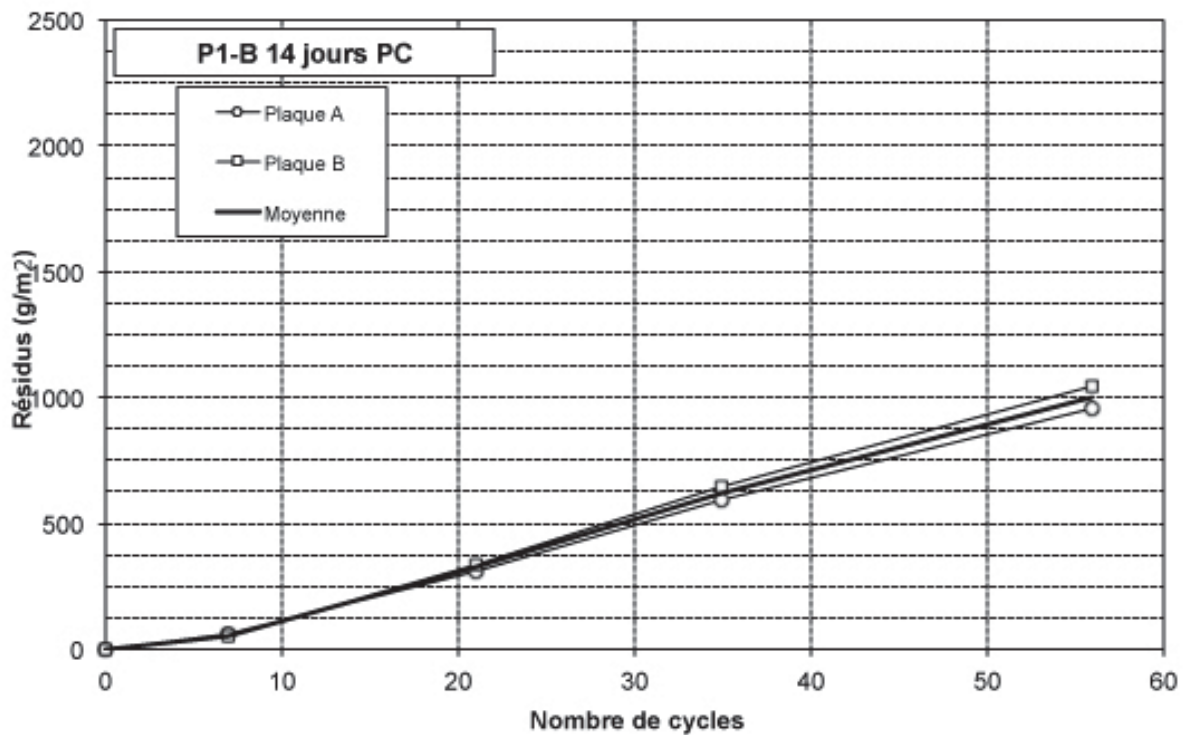
P1-A 56 jours Plaque A



P1-A 56 jours Plaque B

A.2.2 Résultats à l'écaillage du liant B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours avec un agent de cure et aucune cure humide sont présentés sur la Figure A-6.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	16-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	23-juin-15	60	50	55	1a	1a	1a	101,1	101,3	101,2
21	7-juil.-15	313	339	326	1a	1a	1a	101,2	101,4	101,3
35	21-juil.-15	596	643	620	1b	1b	1b	101,1	101,2	101,2
56	11-août-15	961	1045	1003	1b	1b	1b	100,9	101,1	101,0

Figure A-6 - Résultats du test d'écaillage P1-B 14 jours PC

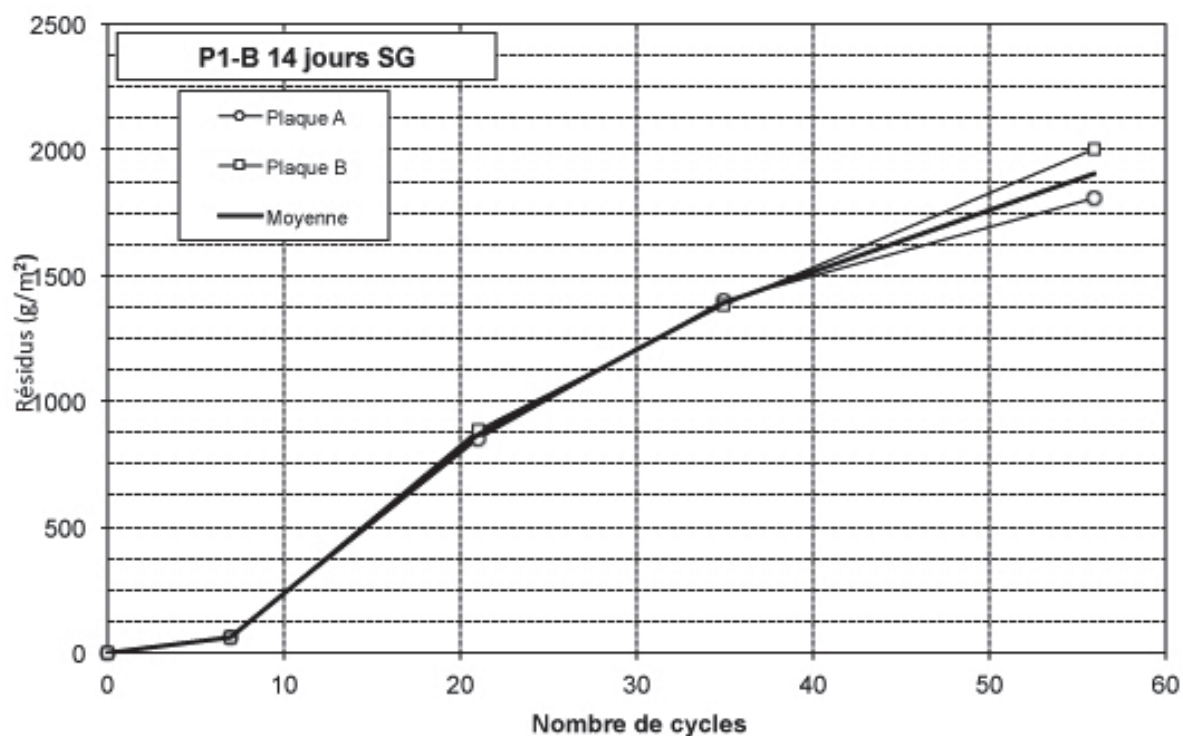


P1-B 14 jours PC Plaque A



P1-B 14 jours PC Plaque B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours sans géotextile au fond du moule de plaque d'écaillage avec une cure en chambre humide de 14 jours sont présentés sur la Figure A-7.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	16-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	23-juin-15	62	64	63	1a	1a	1a	100,7	100,8	100,8
21	7-juil.-15	847	884	865	1a	1a	1a	100,5	100,5	100,5
35	21-juil.-15	1398	1384	1391	1b	1b	1b	100,3	100,4	100,3
56	11-août-15	1805	2008	1906	1b	1b	1b	100,1	100,1	100,1

Figure A-7 - Résultats du test d'écaillage P1-B 14 jours PC

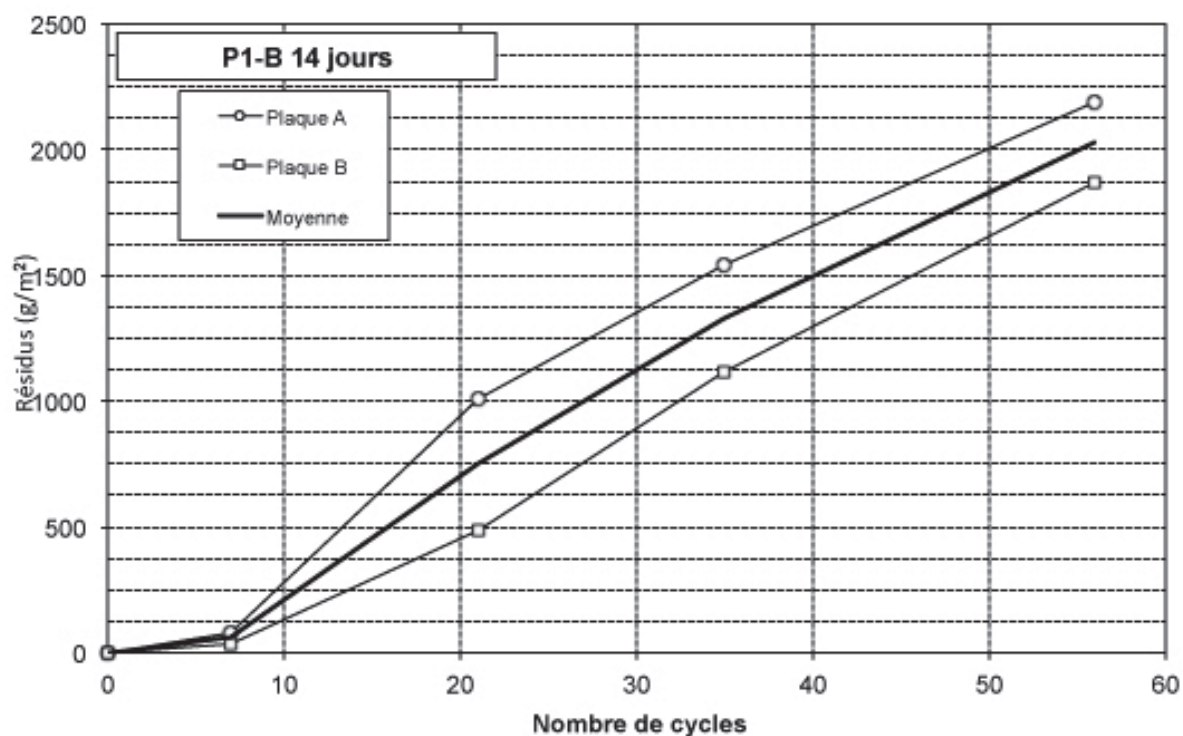


P1-B 14 jours SG Plaque A



P1-B 14 jours SG Plaque B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours selon la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-8.

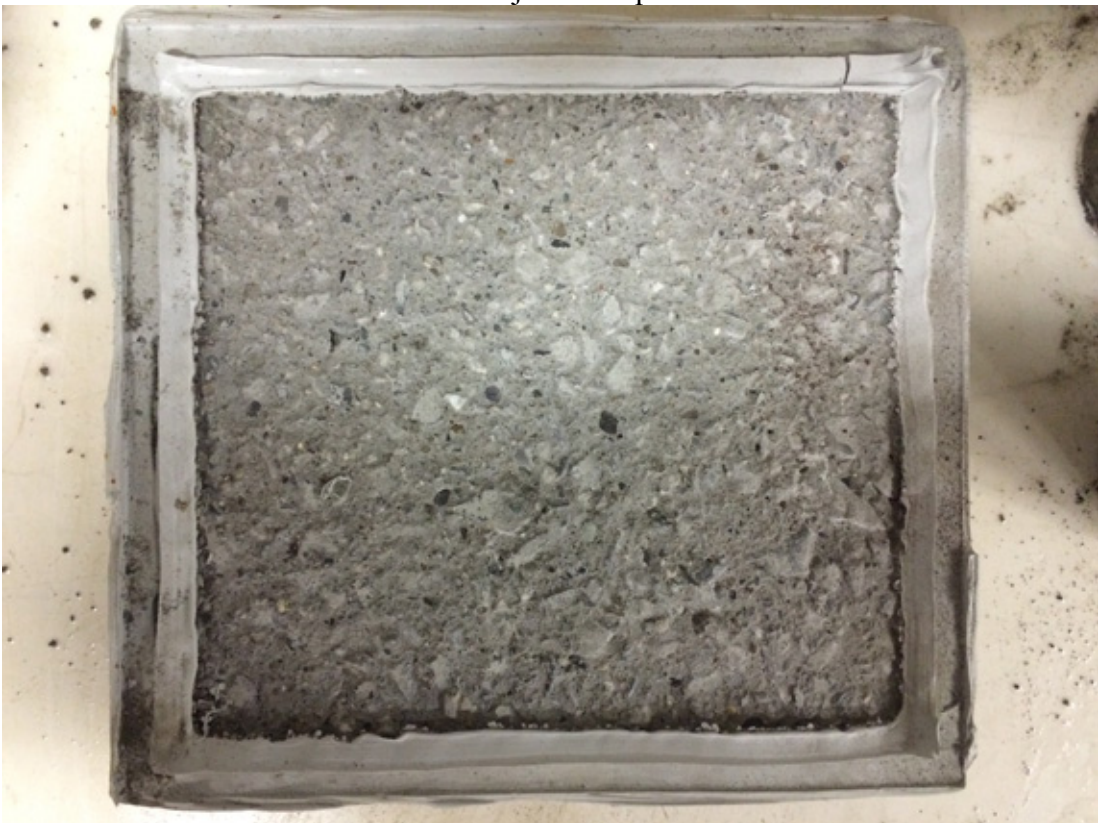


Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	16-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	23-juin-15	82	35	58	1a	1a	1a	100,7	100,8	100,7
21	7-juil.-15	1011	489	750	1a	1a	1a	100,4	100,6	100,5
35	21-juil.-15	1538	1120	1329	1b	1b	1b	100,2	100,4	100,3
56	11-août-15	2192	1874	2033	1b	1b	1b	99,9	100,1	100,0

Figure A-8 - Résultats du test d'écaillage P1-B 14 jours

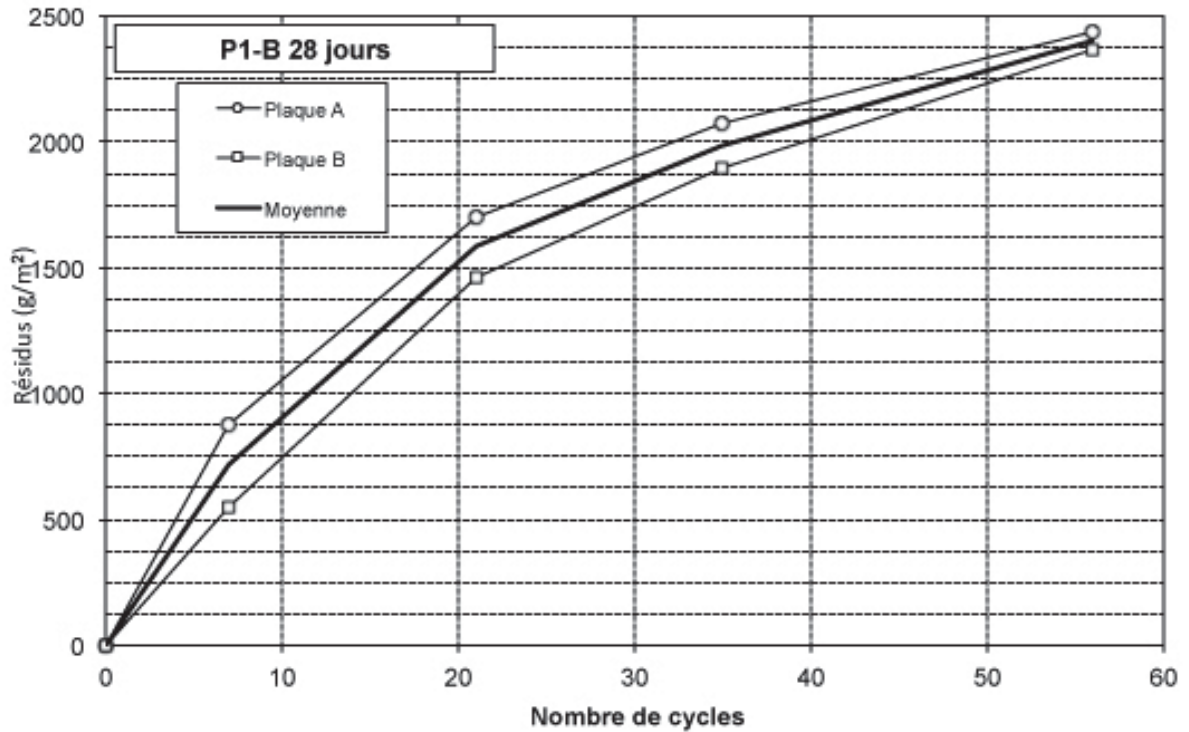


P1-B 14 jours Plaque A



P1-B 14 jours Plaque B

Les résultats avec un mûrissement en chambre humide de 28 jours au lieu des 14 jours prescrits dans la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-9.

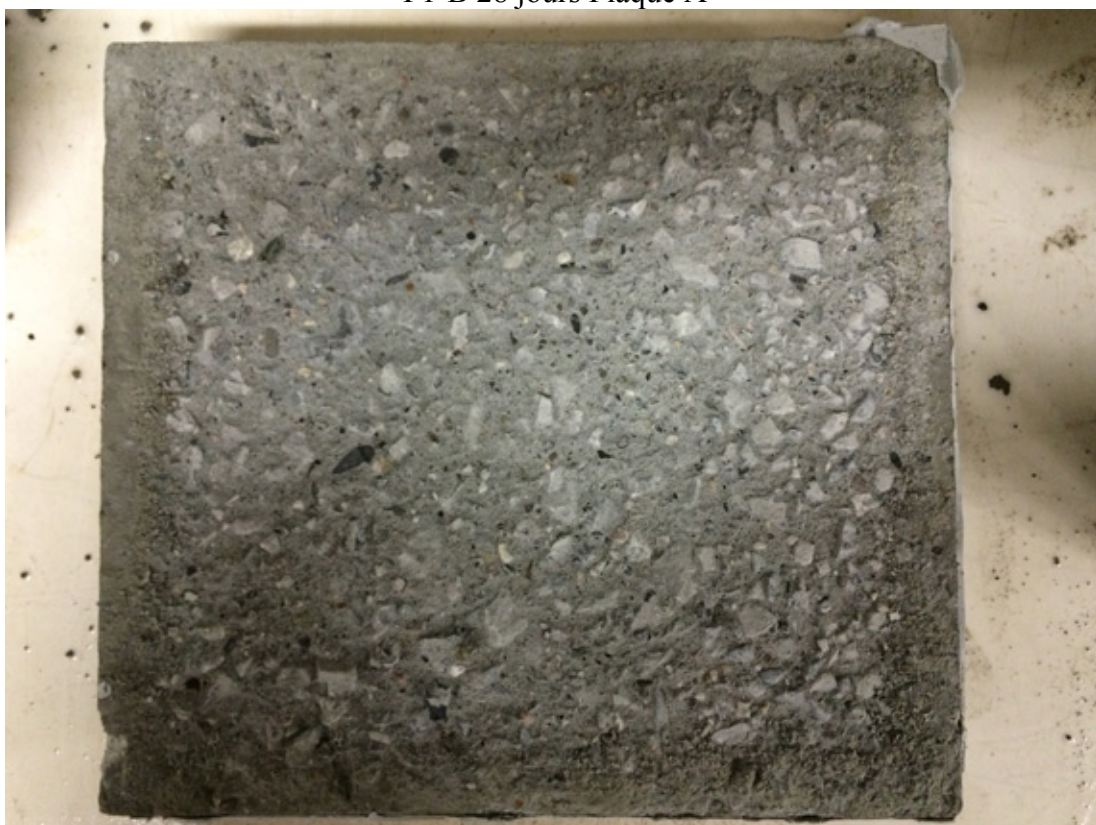


Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	30-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	7-juil.-15	879	549	714	1b	1b	1b	100,3	100,4	100,3
21	21-juil.-15	1700	1466	1583	1b	1b	1b	100,0	100,0	100,0
35	4-août-15	2072	1902	1987	1b	1b	1b	99,9	99,9	99,9
56	25-août-15	2442	2367	2404	1b	1b	1b	99,7	99,7	99,7

Figure A-9 - Résultats du test d'écaillage P1-B 28 jours

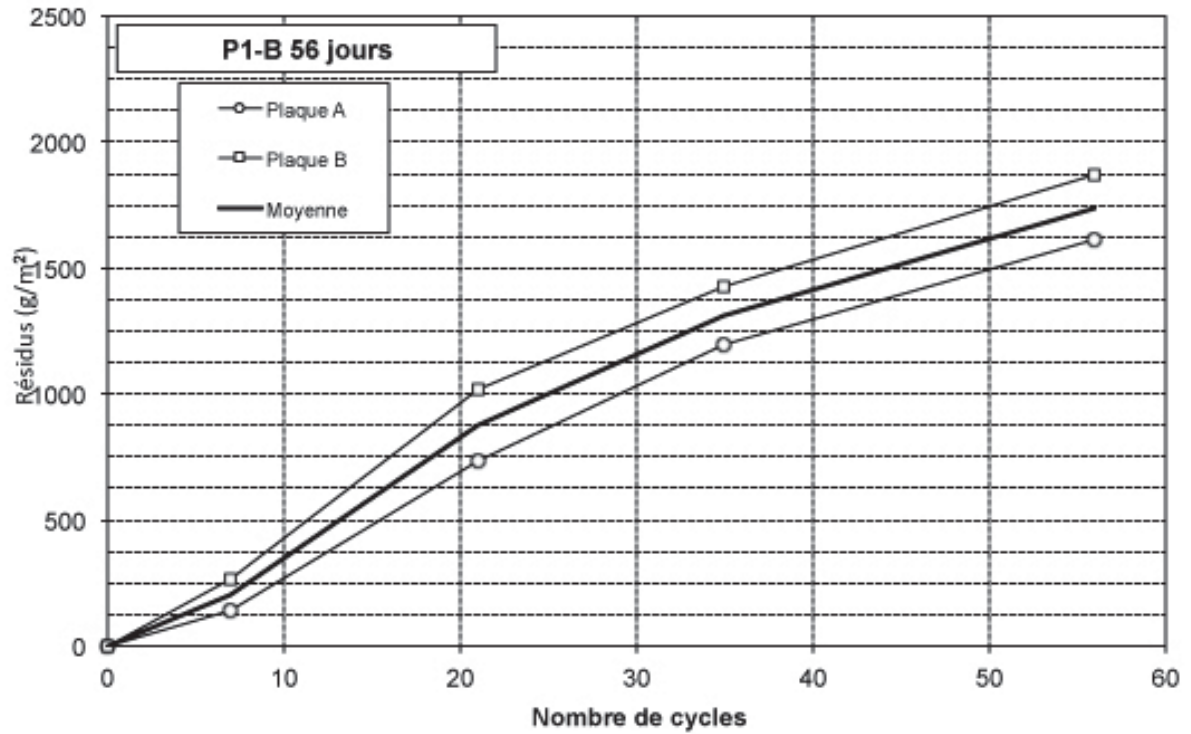


P1-B 28 jours Plaque A



P1-B 28 jours Plaque B

Les résultats avec un mûrissement en chambre humide de 56 jours au lieu des 14 jours prescrits dans la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-10.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	28-juil.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	4-août-15	145	262	203	1a	1a	1a	100,5	100,5	100,5
21	18-août-15	736	1023	880	1a	1a	1a	100,3	100,1	100,2
35	1-sept.-15	1196	1430	1313	1a	1a	1a	100,0	99,9	100,0
56	22-sept.-15	1614	1868	1741	1a	1a	1a	99,9	99,8	99,8

Figure A-10 - Résultats du test d'écaillage P1-B 56 jours



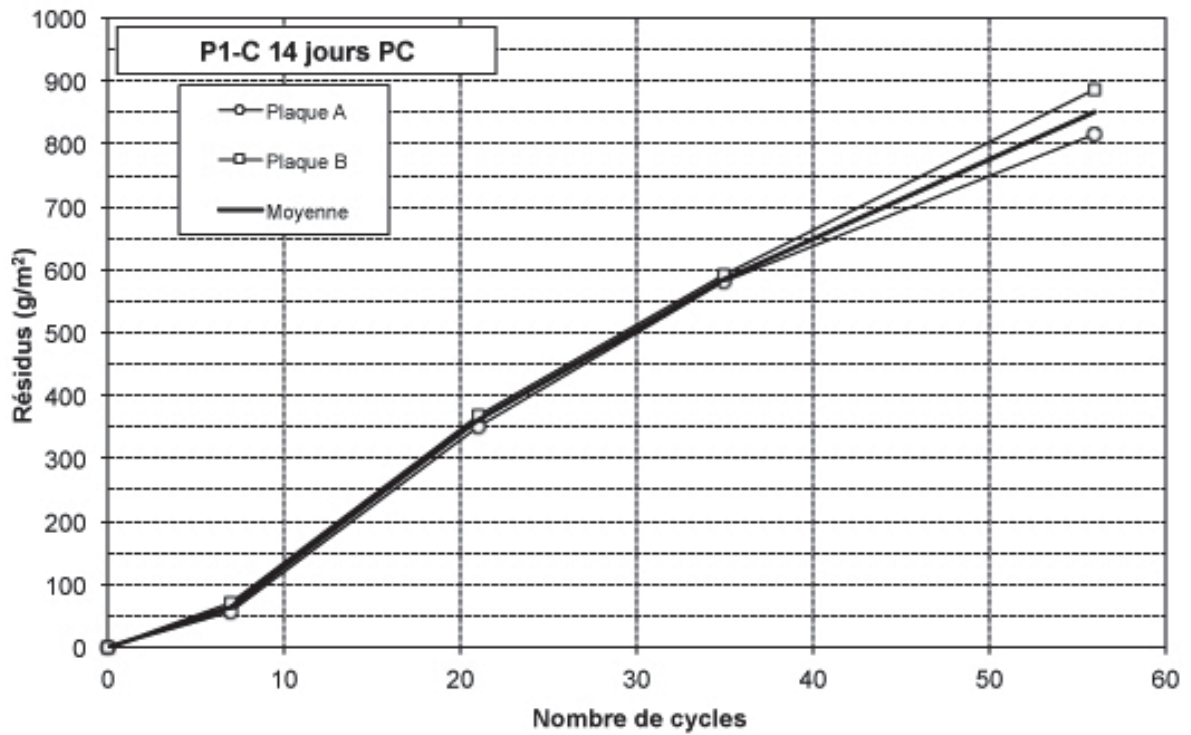
P1-B 56 jours Plaque A



P1-B 56 jours Plaque B

A.2.3 Résultats à l'écaillage du liant C

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours avec un agent de cure et aucune cure humide sont présentés sur la Figure A-11.

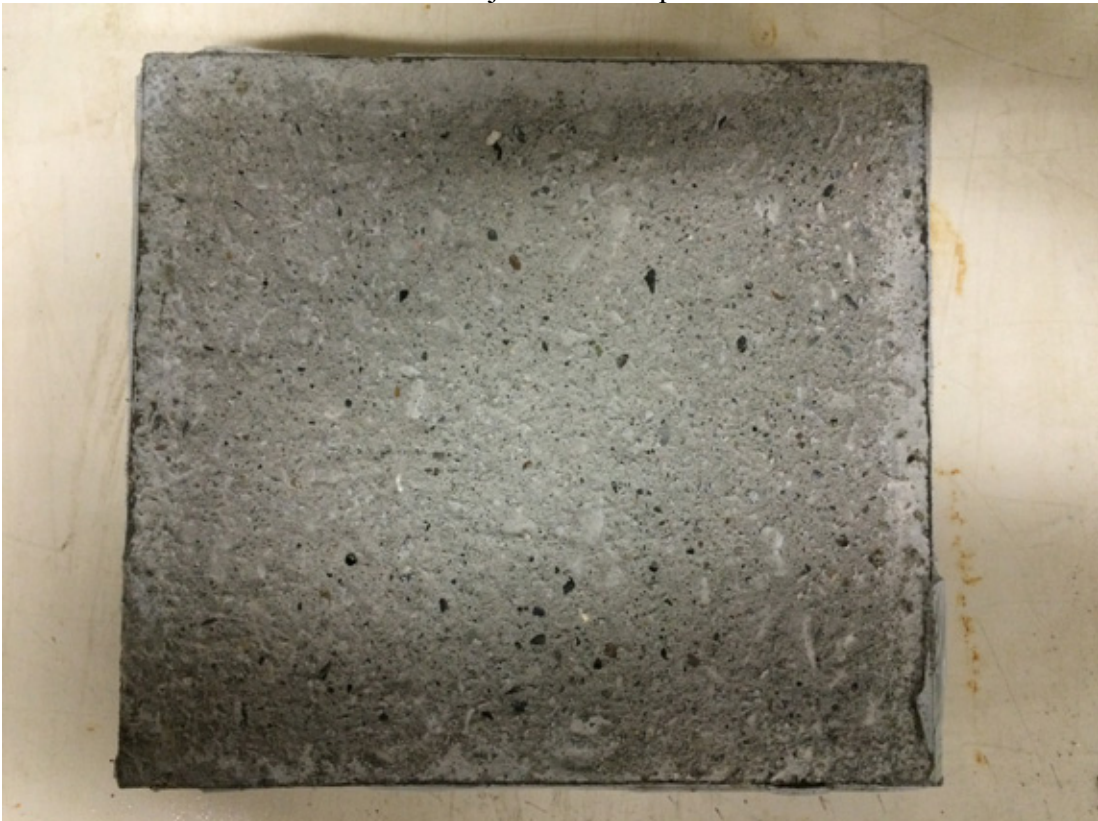


Cycle	Date	Résidu (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	9-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	16-juin-15	58	70	64	1a	1a	1a	101,1	101,1	101,1
21	30-juin-15	351	370	361	1a	1a	1a	100,9	100,9	100,9
35	14-juil.-15	583	591	587	1b	1b	1b	101,0	101,0	101,0
56	4-août-15	816	888	852	1b	1b	1b	101,0	100,9	101,0

Figure A-11 - Résultats du test d'écaillage P1-C 14 jours PC

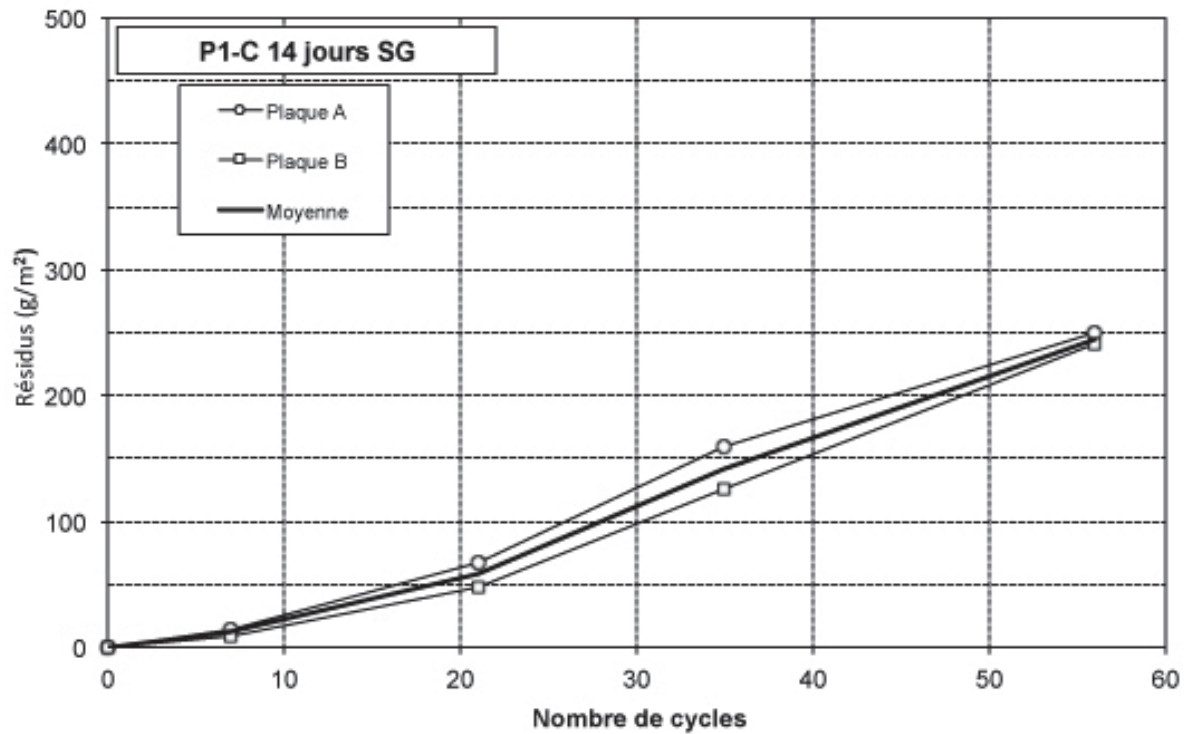


P1-C 14 jours PC Plaque A



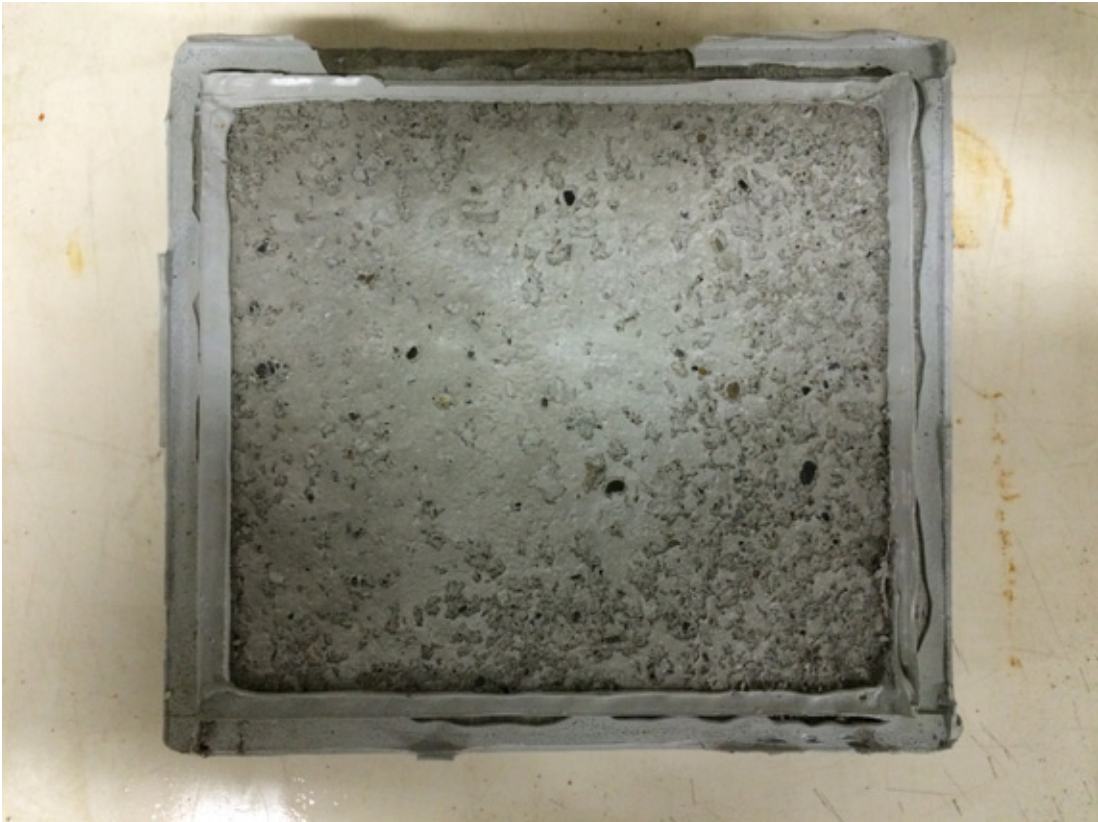
P1-C 14 jours PC Plaque B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours sans géotextile au fond du moule de plaque d'écaillage avec une cure en chambre humide de 14 jours sont présentés sur la Figure A-12.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	9-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	16-juin-15	14	10	12	1a	1a	1a	100,7	102,8	101,7
21	30-juin-15	68	48	58	1a	1a	1a	100,7	102,7	101,7
35	14-juil.-15	159	126	142	1a	1a	1a	100,7	102,8	101,7
56	4-août-15	250	240	245	1a	1a	1a	100,7	102,8	101,8

Figure A-12 - Résultats du test d'écaillage P1-C 14 jours SG

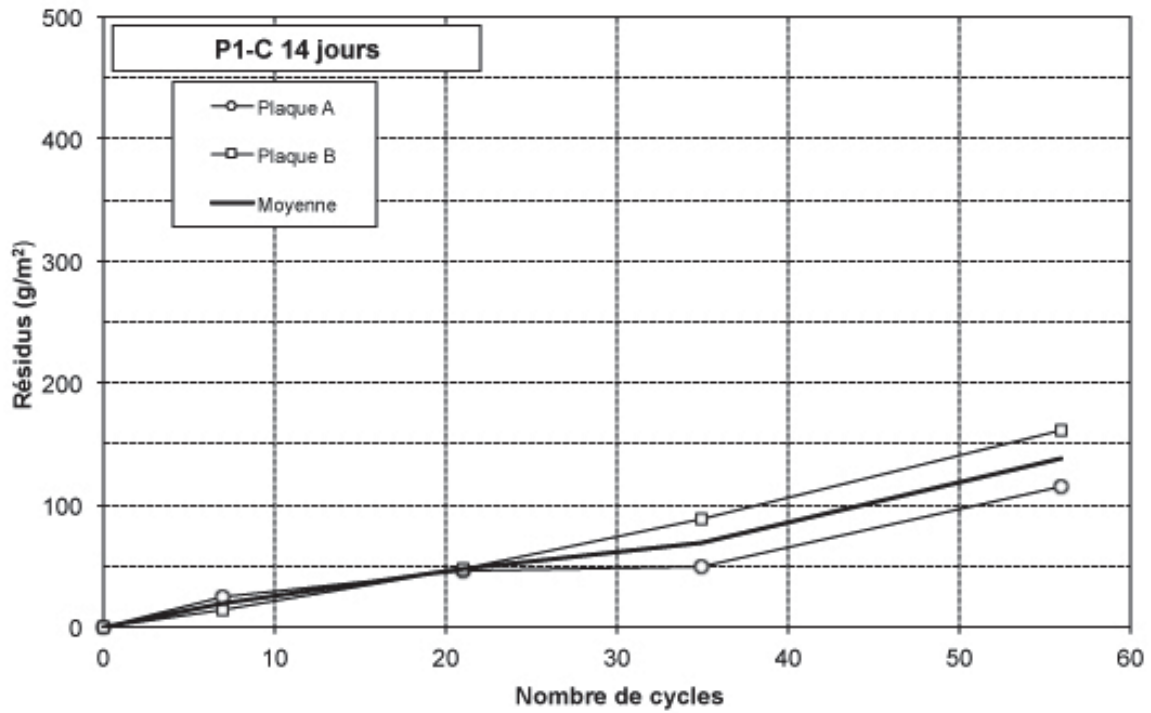


P1-C 14 jours SG Plaque A



P1-C 14 jours SG Plaque B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours selon la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-13.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	9-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	16-juin-15	25	13	19	1a	1a	1a	100,8	995,5	548,1
21	30-juin-15	46	48	47	1a	1a	1a	100,7	100,7	100,7
35	14-juil.-15	50	88	69	1a	1a	1a	100,8	100,7	100,8
56	4-août-15	115	161	138	1a	1a	1a	100,8	100,7	100,8

Figure A-13 - Résultats du test d'écaillage P1-C 14 jours

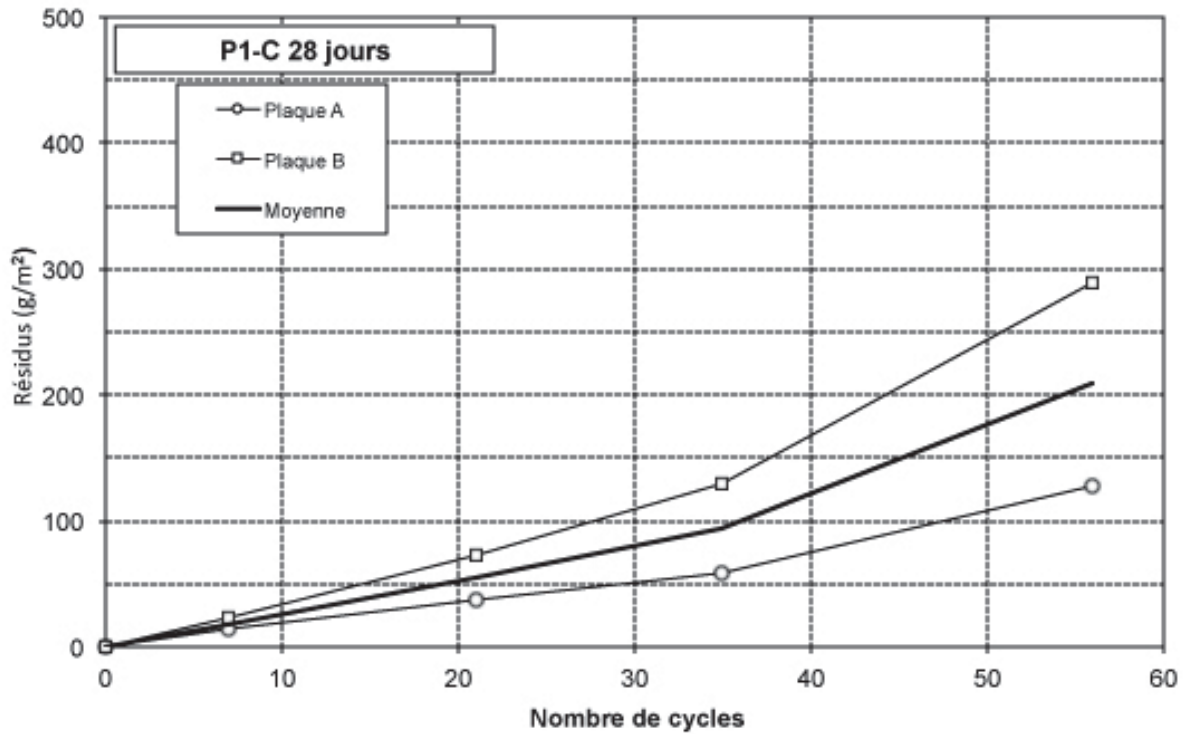


P1-C 14 jours Plaque A



P1-C 14 jours Plaque B

Les résultats avec un mûrissement en chambre humide de 28 jours au lieu des 14 jours prescrits dans la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-14.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	23-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	30-juin-15	14	23	18	1a	1a	1a	100,6	100,5	100,6
21	14-juil.-15	37	73	55	1a	1a	1a	100,7	100,6	100,6
35	28-juil.-15	58	129	94	1a	1a	1a	100,7	100,6	100,6
56	18-août-15	128	289	209	1a	1a	1a	100,7	100,6	100,6

Figure A-14 - Résultats du test d'écaillage P1-C 28 jours

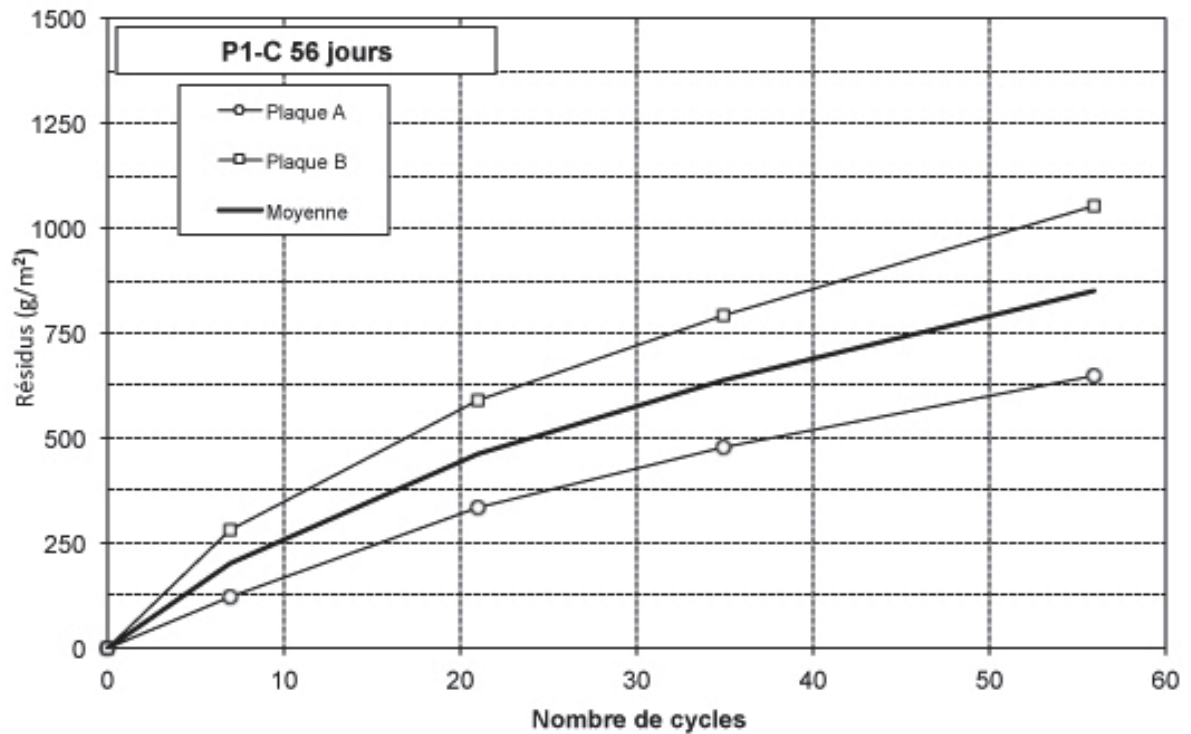


P1-C 28 jours Plaque A



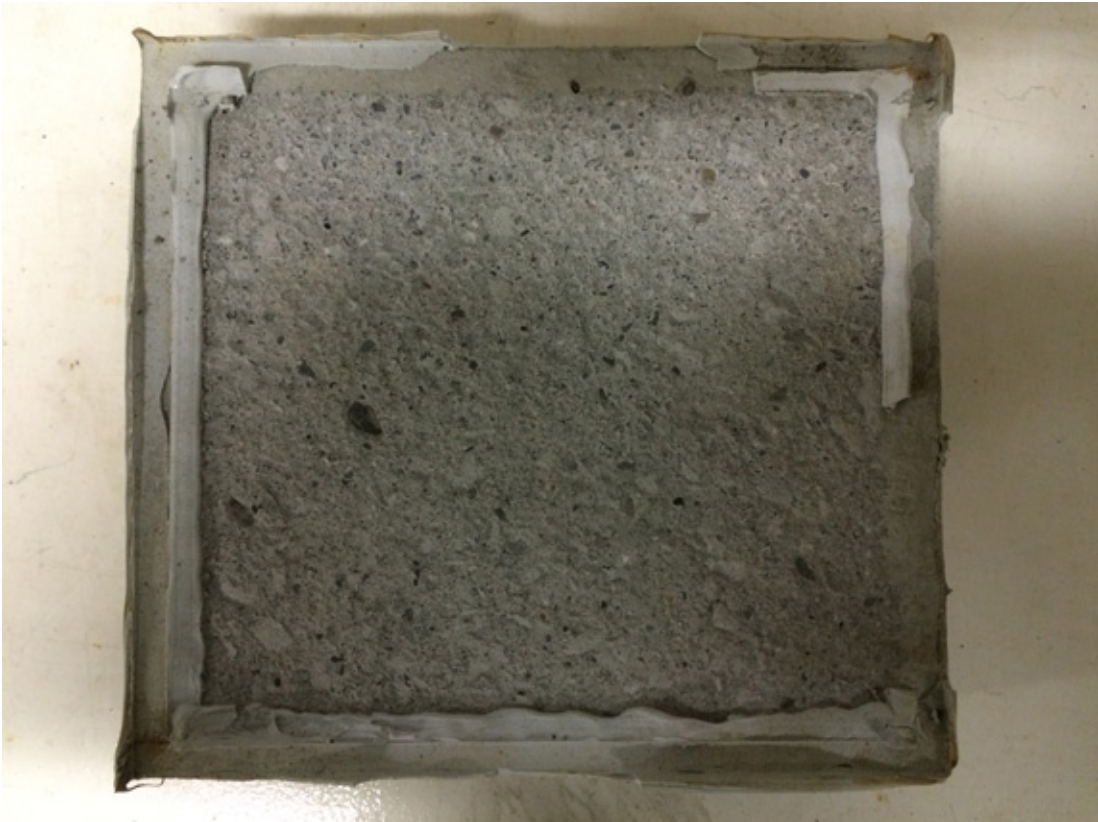
P1-C 28 jours Plaque B

Les résultats avec un mûrissement en chambre humide de 56 jours au lieu des 14 jours s dans la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-15.

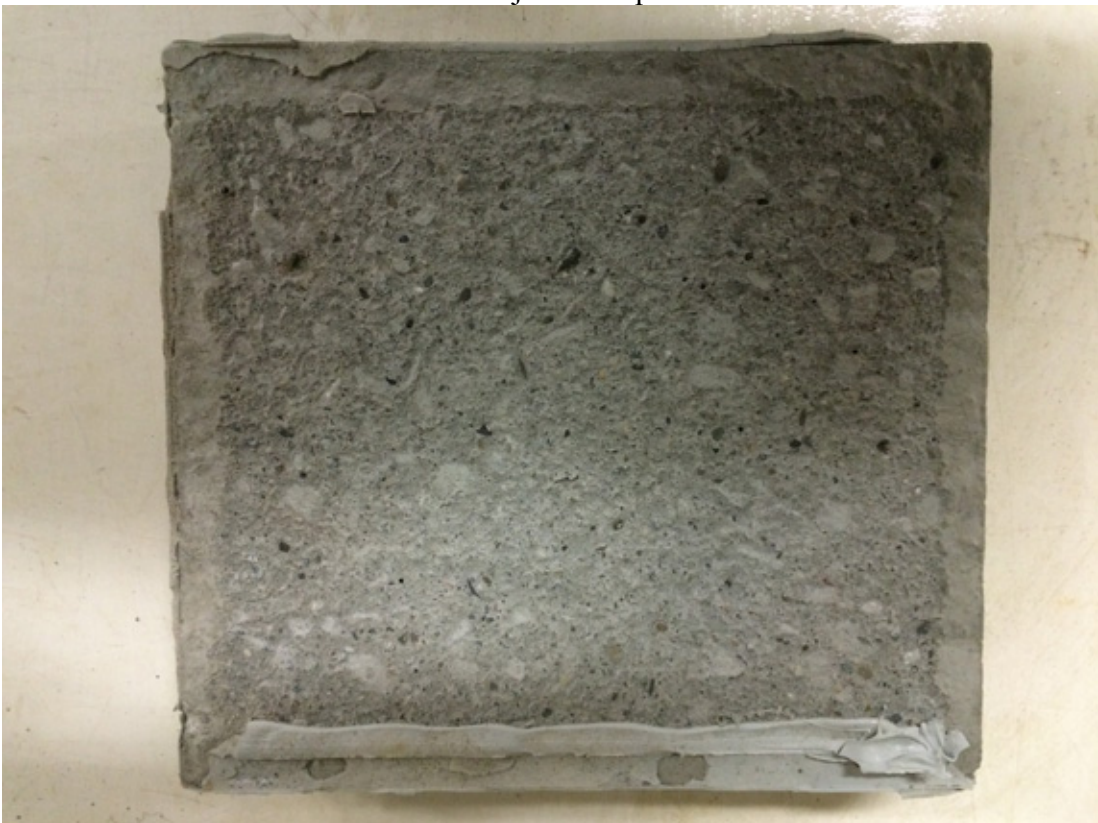


Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	21-juil.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	28-juil.-15	124	281	203	1a	1a	1a	100,5	100,4	100,5
21	11-août-15	333	593	463	1a	1a	1a	100,4	100,3	100,4
35	25-août-15	481	795	638	1a	1a	1a	100,3	100,3	100,3
56	15-sept.-15	651	1052	852	1a	1a	1a	100,3	100,2	100,3

Figure A-15 - Résultats du test d'écaillage P1-C 56 jours



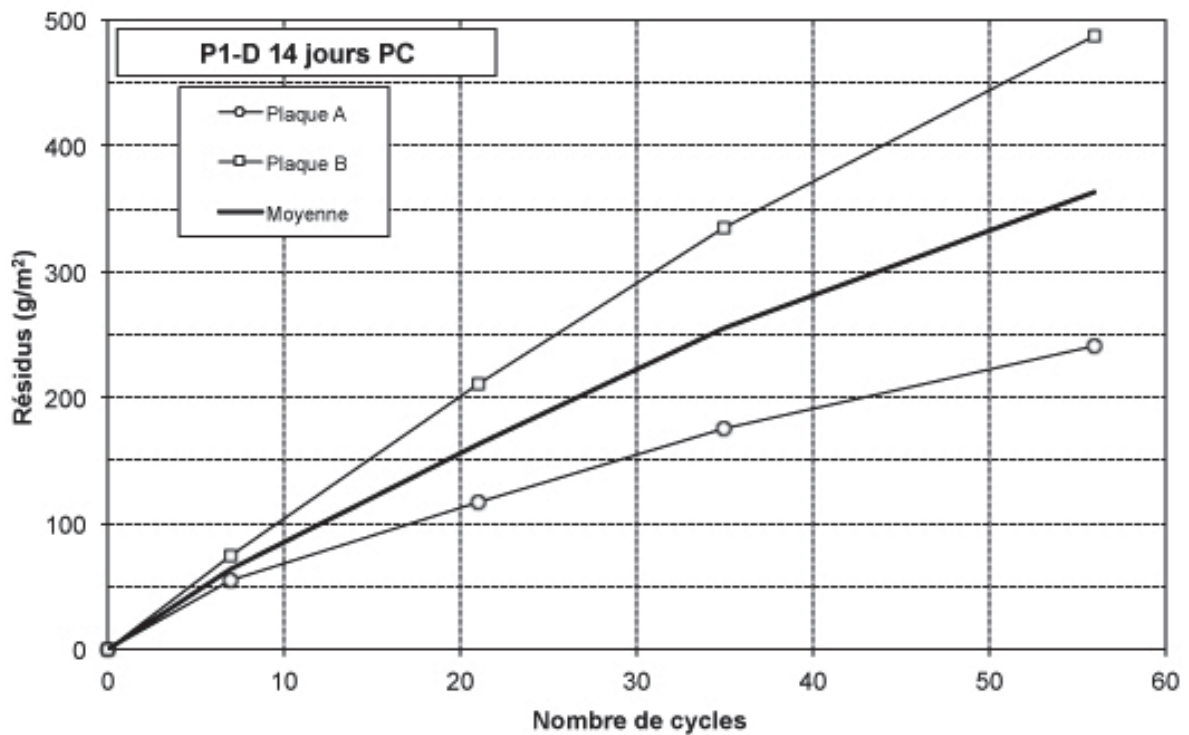
P1-C 56 jours Plaque A



P1-C 56 jours Plaque B

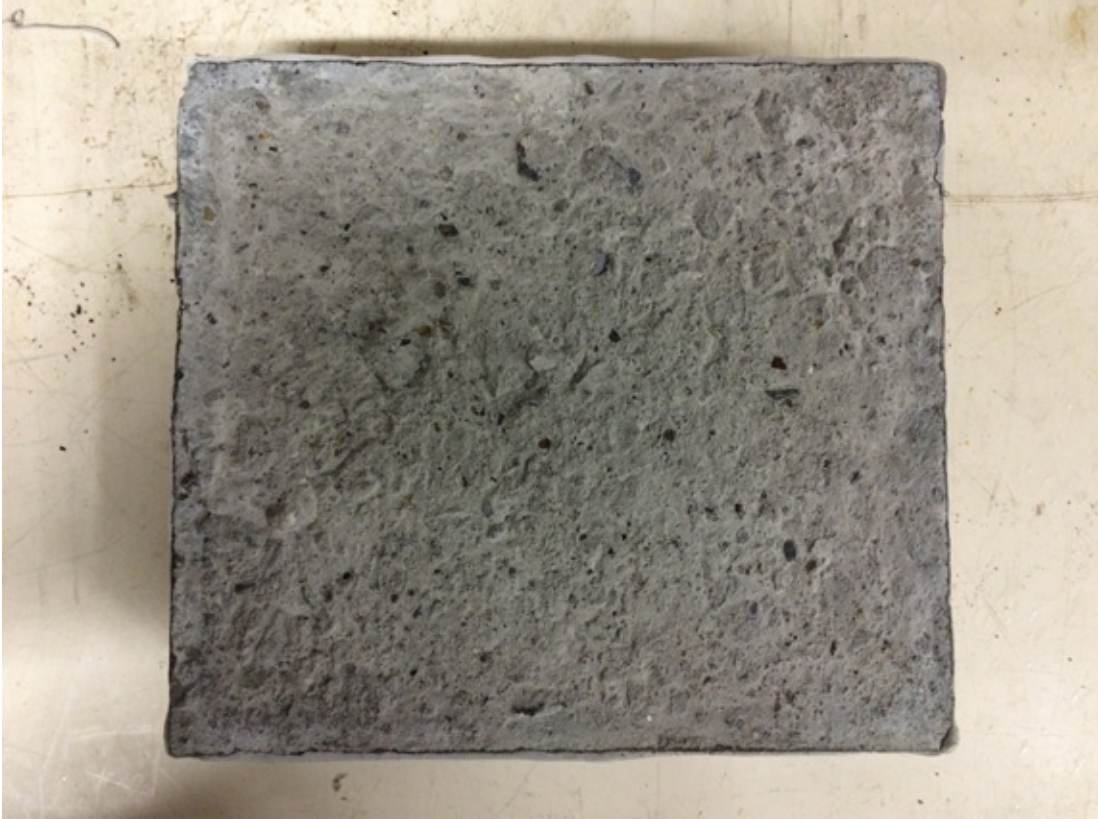
A.2.4 Résultats à l'écaillage du liant D

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours avec un agent de cure et aucune cure humide sont présentés sur la Figure A-16.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	2-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	9-juin-15	54	74	64	1a	1a	1a	101,0	100,7	100,9
21	23-juin-15	116	211	164	1a	1a	1a	101,1	100,7	100,9
35	7-juil.-15	176	335	256	1a	1a	1a	101,2	100,8	101,0
56	28-juil.-15	240	487	364	1a	1a	1a	101,2	100,7	101,0

Figure A-16 - Résultats du test d'écaillage P1-D 14 jours PC



P1-D 14 jours PC Plaque A



P1-D 14 jours PC Plaque B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours sans géotextile au fond du moule de plaque d'écaillage avec une cure en chambre humide de 14 jours sont présentés sur la Figure A-17.

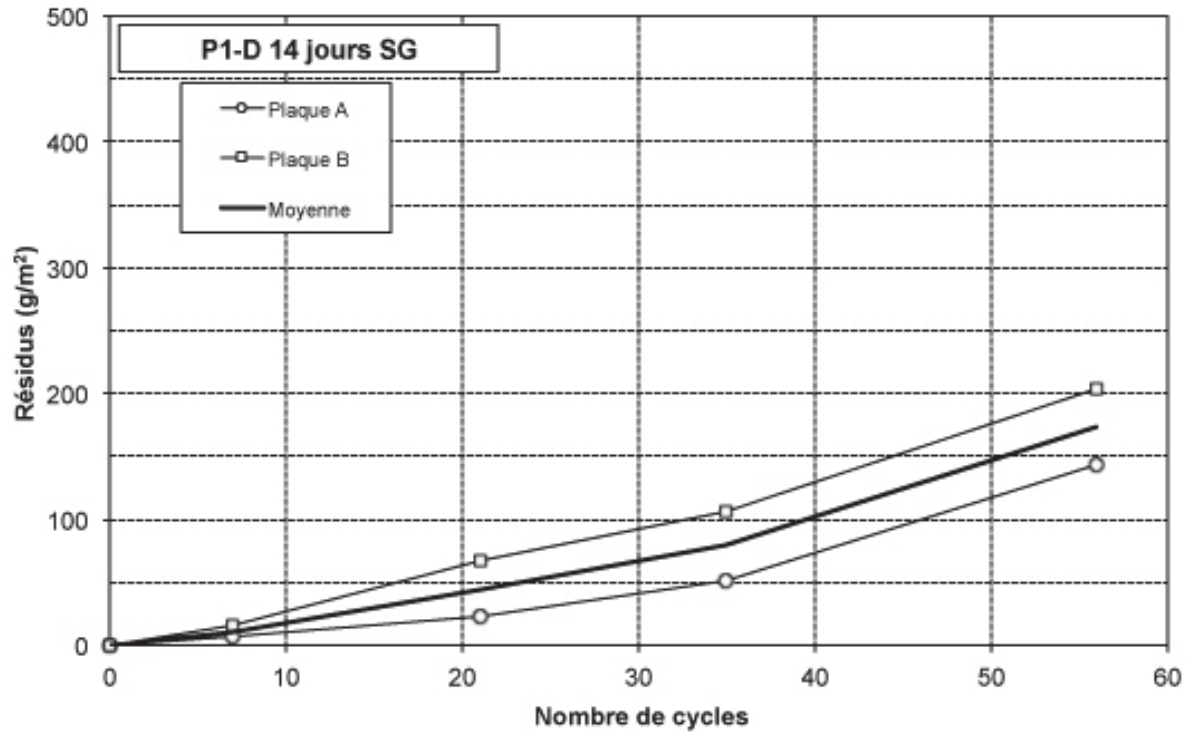


Figure A-17 - Résultats du test d'écaillage P1-D 14 jours SG

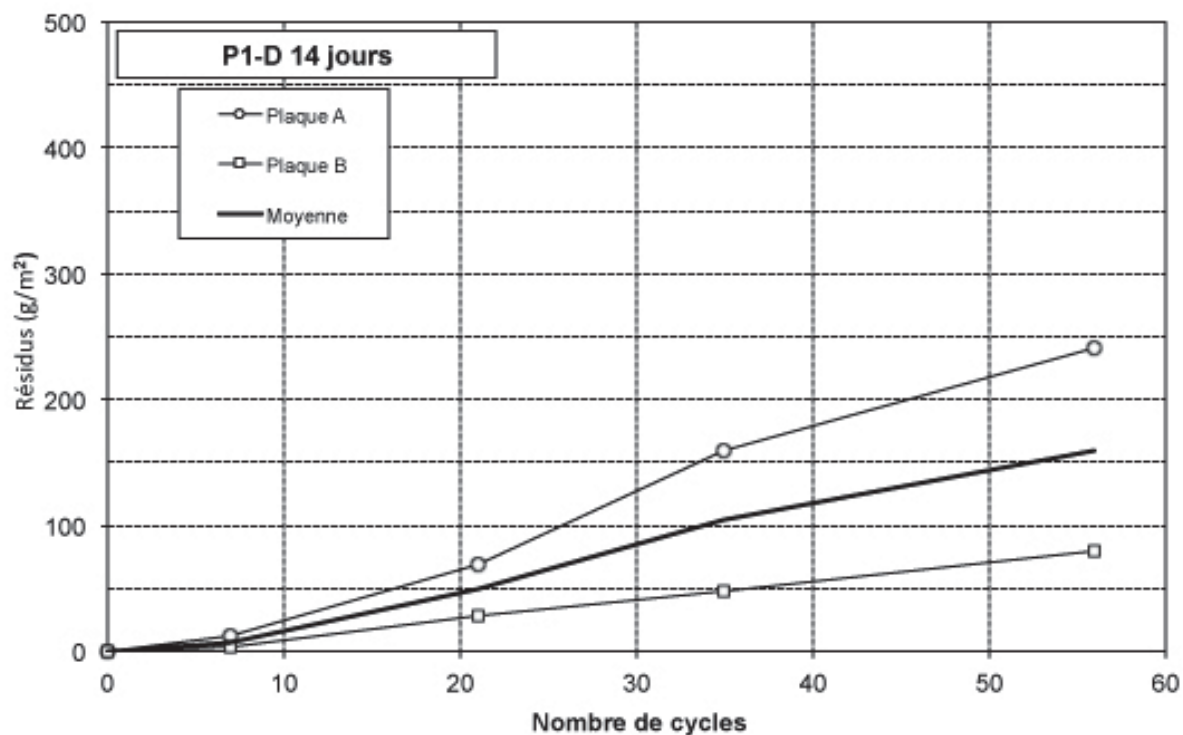


P1-D 14 jours SG Plaque A



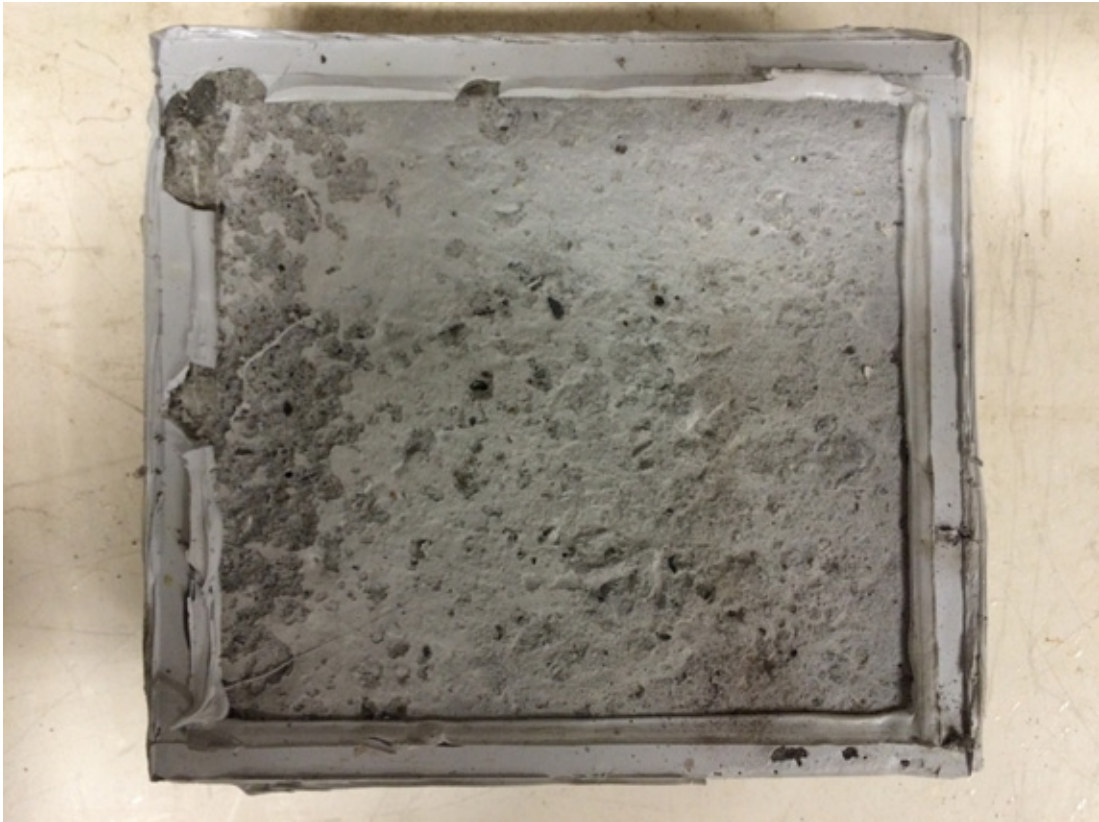
P1-D 14 jours SG Plaque B

Les résultats avec un mûrissement de 14 jours selon la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-18.

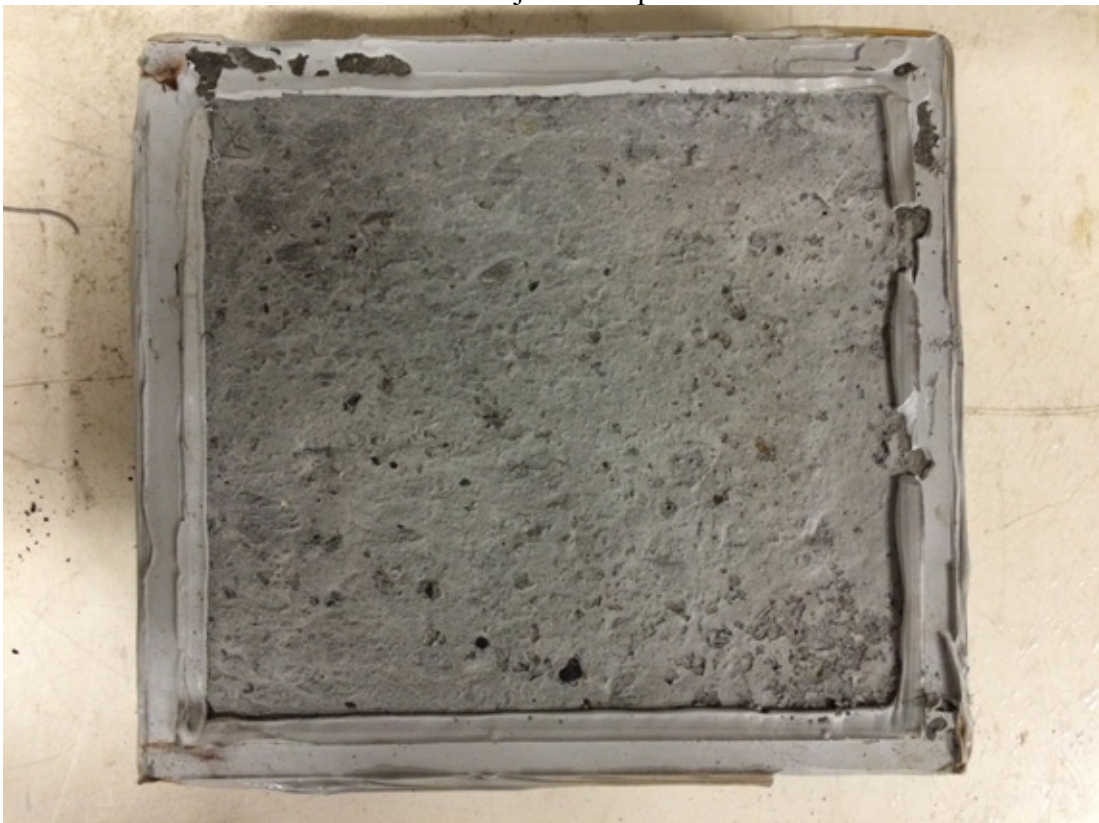


Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	2-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	9-juin-15	12	4	8	1a	1a	1a	100,8	100,7	100,7
21	23-juin-15	69	29	49	1a	1a	1a	100,8	100,7	100,7
35	7-juil.-15	160	48	104	1a	1a	1a	100,8	100,8	100,8
56	28-juil.-15	241	79	160	1a	1a	1a	100,8	100,7	100,8

Figure A-18 - Résultats du test d'écaillages P1-D 14 jours

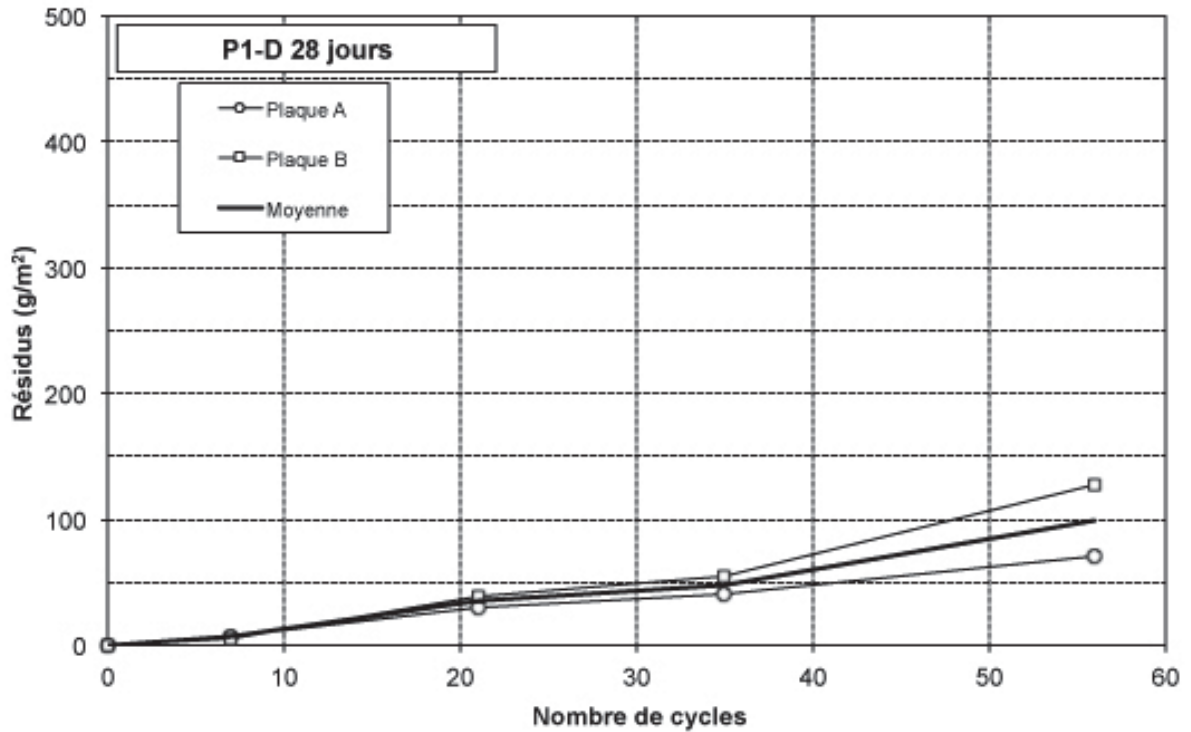


P1-D 14 jours Plaque A



P1-D 14 jours Plaque B

Les résultats avec un mûrissement en chambre humide de 28 jours au lieu des 14 jours prescrits dans la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-19.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	2-juin-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	9-juin-15	8	6	7	1a	1a	1a	100,5	100,5	100,5
21	23-juin-15	31	39	35	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
35	7-juil.-15	41	55	48	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
56	28-juil.-15	72	129	100	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6

Figure A-19 - Résultats du test d'écaillage P1-D 28 jours

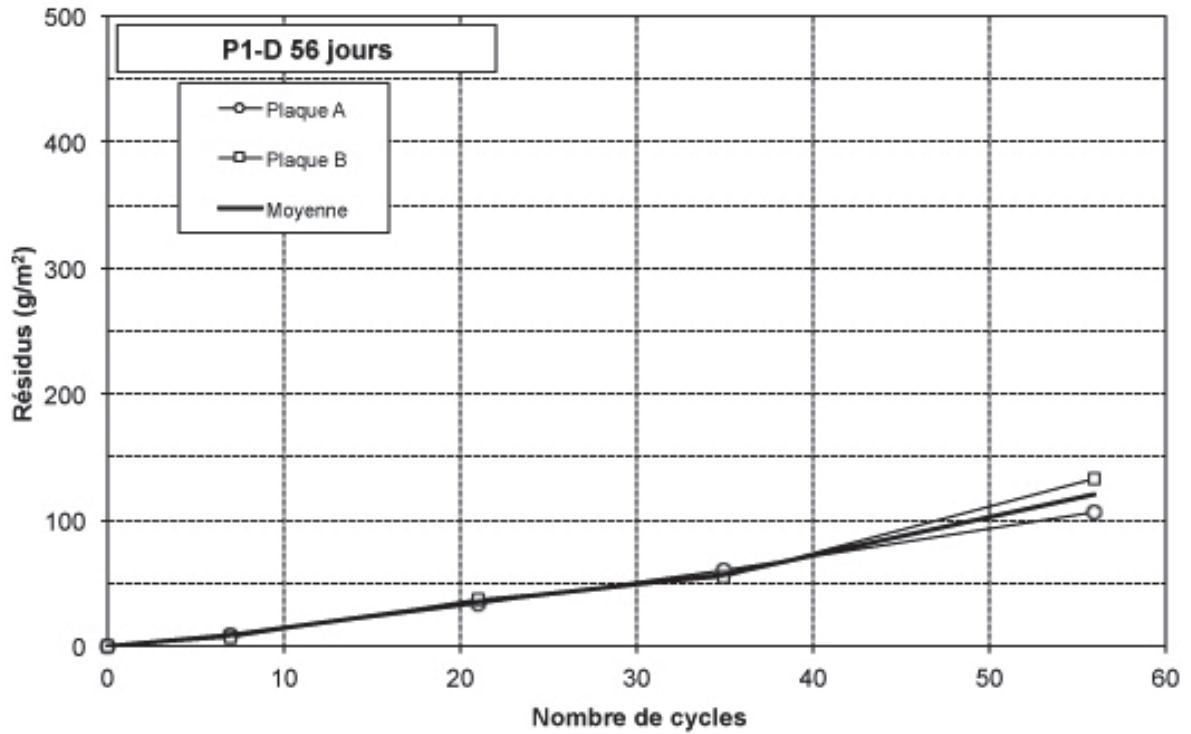


P1-D 28 jours Plaque A



P1-D 28 jours Plaque B

Les résultats avec un mûrissement en chambre humide de 56 jours au lieu des 14 jours prescrits dans la norme BNQ 2621-905 sont présentés sur la Figure A-20.

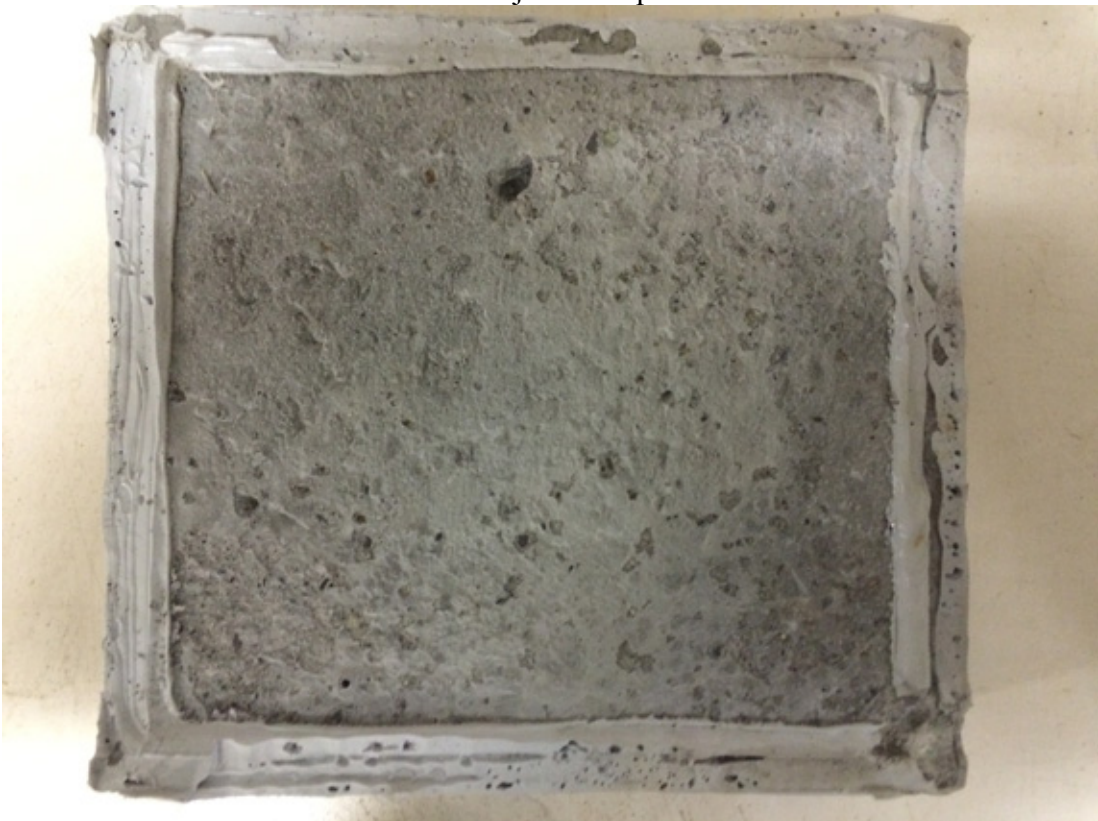


Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	14-juil.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	21-juil.-15	10	8	9	1a	1a	1a	100,5	100,5	100,5
21	4-août-15	33	37	35	1a	1a	1a	100,5	100,5	100,5
35	18-août-15	60	54	57	1a	1a	1a	100,5	100,5	100,5
56	8-sept-15	107	134	120	1a	1a	1a	100,5	100,5	100,5

Figure A-20 - Résultats du test d'écaillage P1-D 56 jours



P1-D 56 jours Plaque A

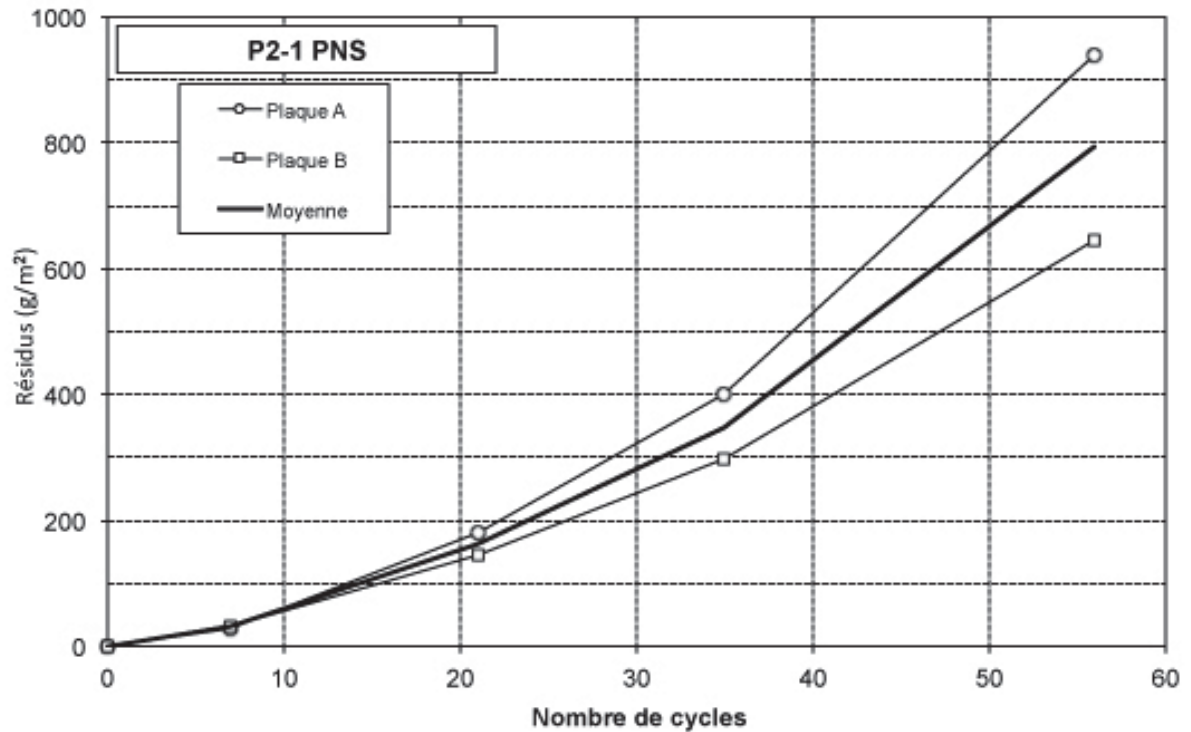


P1-D 56 jours Plaque B

A.3 Résultats détaillés de la phase 2

A.3.1 Écaillages des bétons avec PNS

Les résultats des gâchées réalisées avec le PNS-1 sont présentés sur la Figure A-21 et Figure A-21.



Cycle	Date	Résidu (g/m²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	18-août-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	25-août-15	29	32	30	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
21	8-sept.-15	182	147	164	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
35	22-sept.-15	401	297	349	1a	1a	1a	100,6	100,5	100,5
56	13-oct.-15	940	646	793	1a	1a	1a	100,3	100,4	100,3

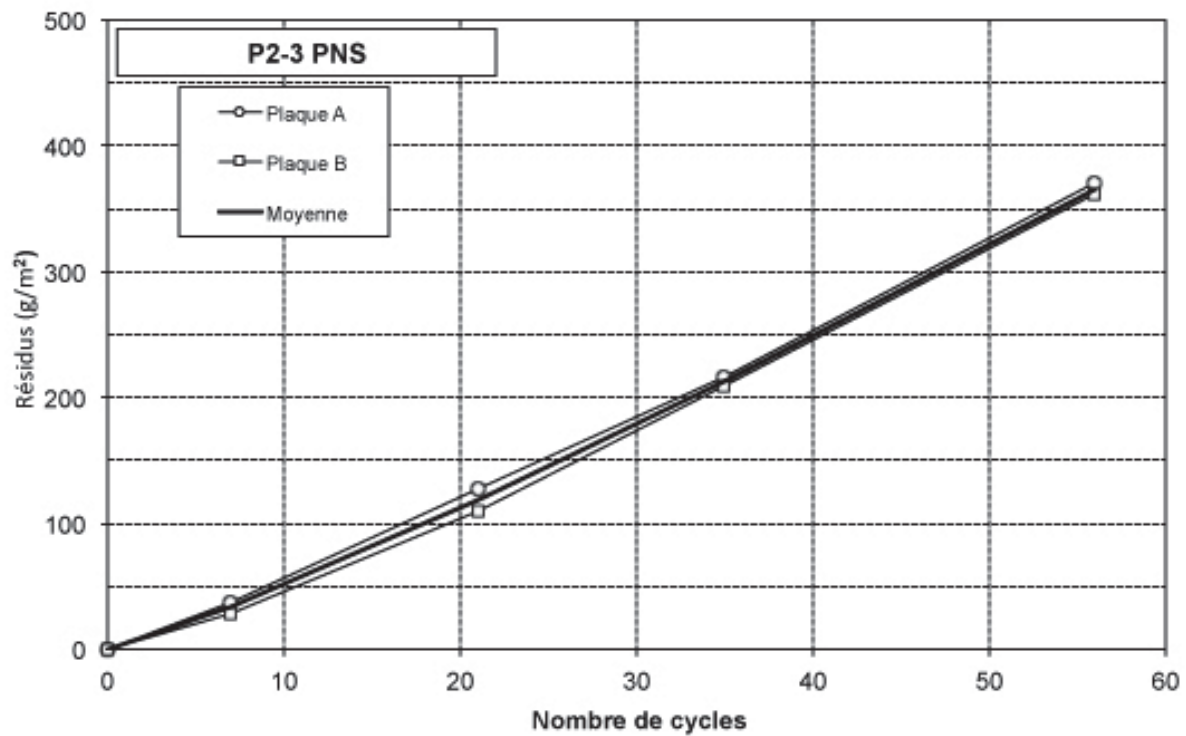
Figure A-21 - Résultats du test d'écaillage de P2-1 réalisé avec un SP PNS



P2-1 PNS Plaque A



P2-1 PNS Plaque B



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	1-sept.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	8-sept.-15	37	29	33	1a	1a	1a	100,5	100,6	100,6
21	22-sept.-15	128	109	119	1a	1a	1a	100,5	100,6	100,6
35	6-oct.-15	217	209	213	1a	1a	1a	100,4	100,5	100,5
56	27-oct.-15	370	361	366	1a	1a	1a	100,4	100,5	100,5

Figure A-22 - Résultats du test d'écaillage de P2-3 réalisé avec un SP PNS



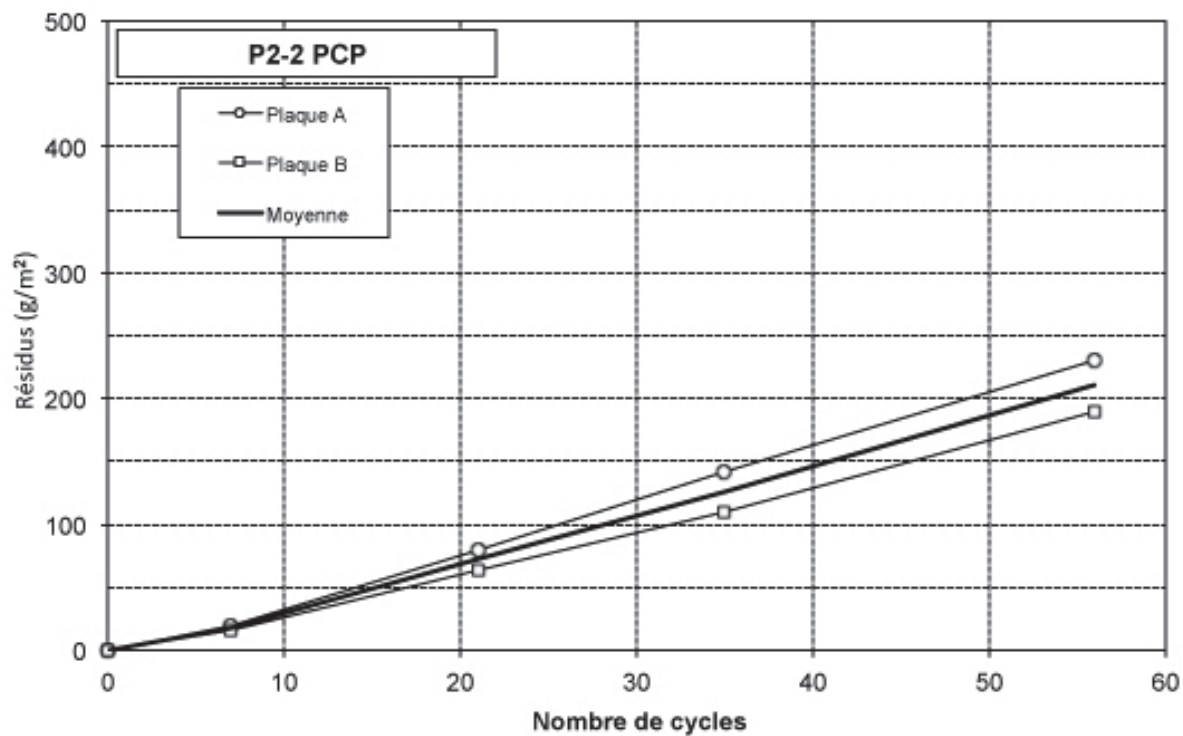
P2-3 PNS Plaque A



P2-3 PNS Plaque B

A.3.2 Écaillages des bétons avec PCP

Les résultats de la gâchée réalisée avec le PCP-1 sont présentés sur la Figure A-23.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	25-août-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	1-sept.-15	20	16	18	1a	1a	1a	100,5	100,6	100,6
21	15-sept.-15	80	64	72	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
35	29-sept.-15	143	110	127	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
56	20-oct.-15	231	190	210	1a	1a	1a	100,5	100,6	100,6

Figure A-23 - Résultats du test d'écaillage de P2-2 réalisé avec un SP PCP



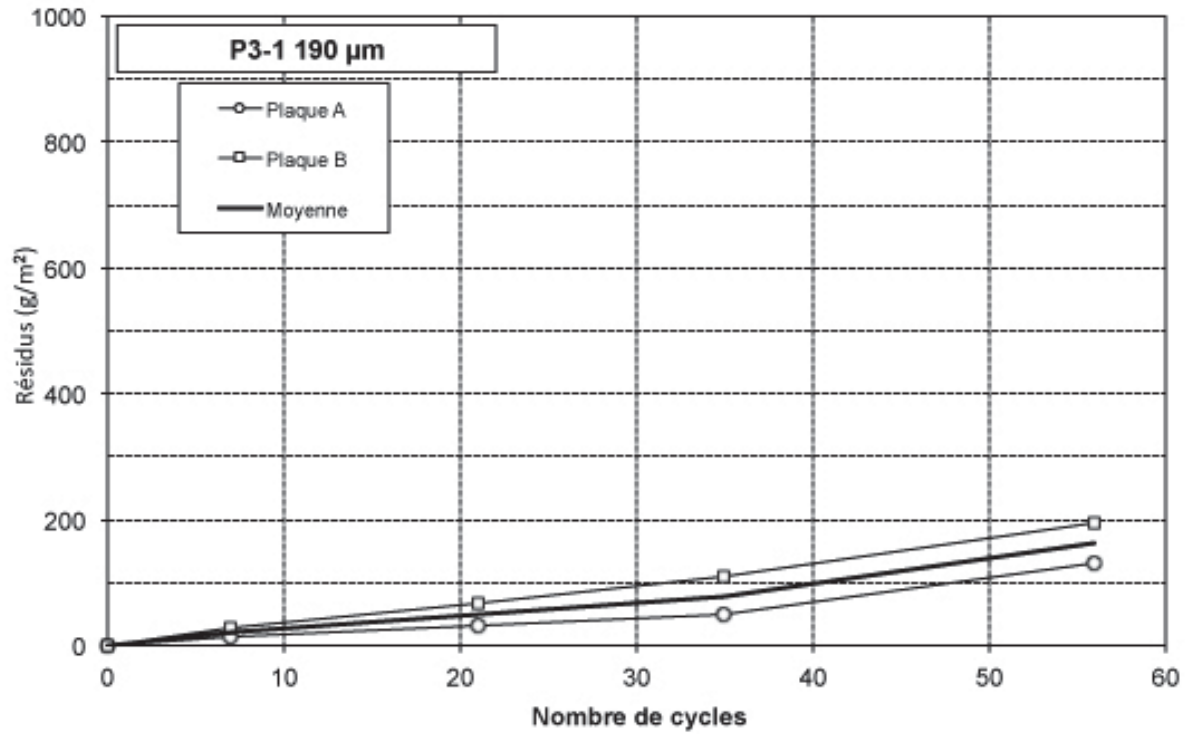
P2-2 PCP Plaque A



P2-2 PCP Plaque B

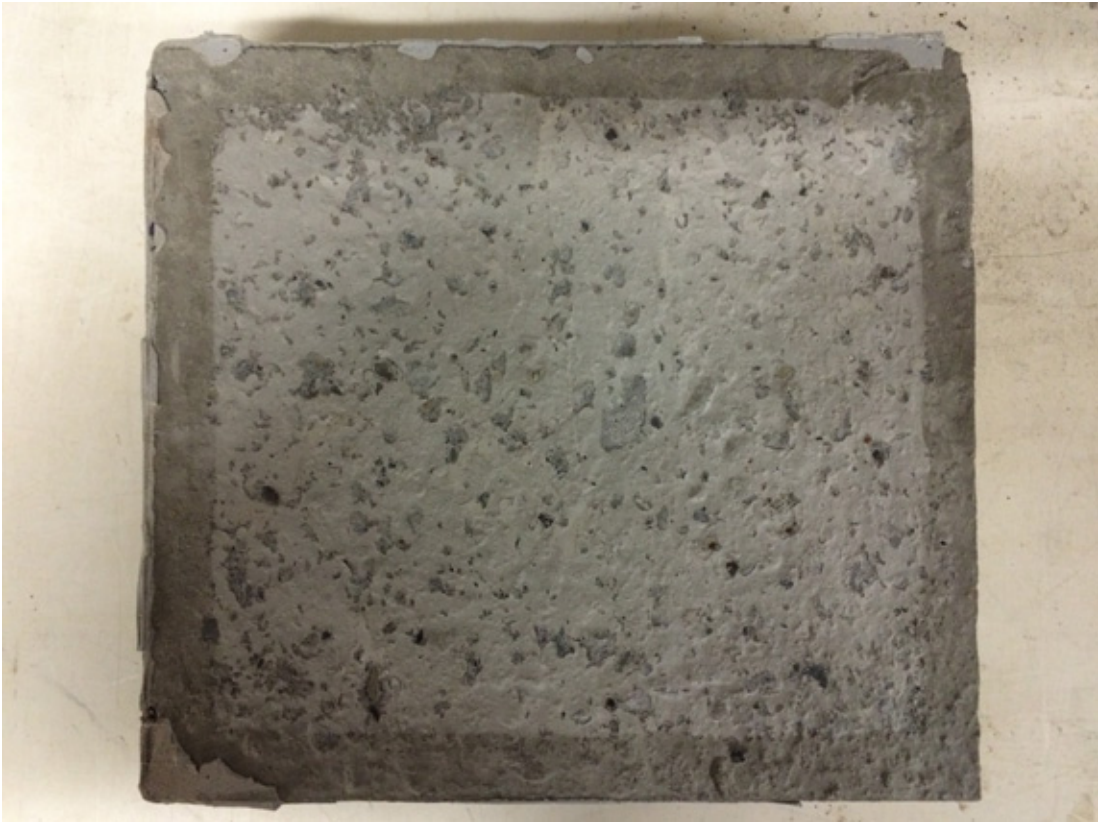
A.4 Résultats détaillés de la phase 3

Les résultats à l'écaillage de P3-1 sont présentés sur la Figure A-24.

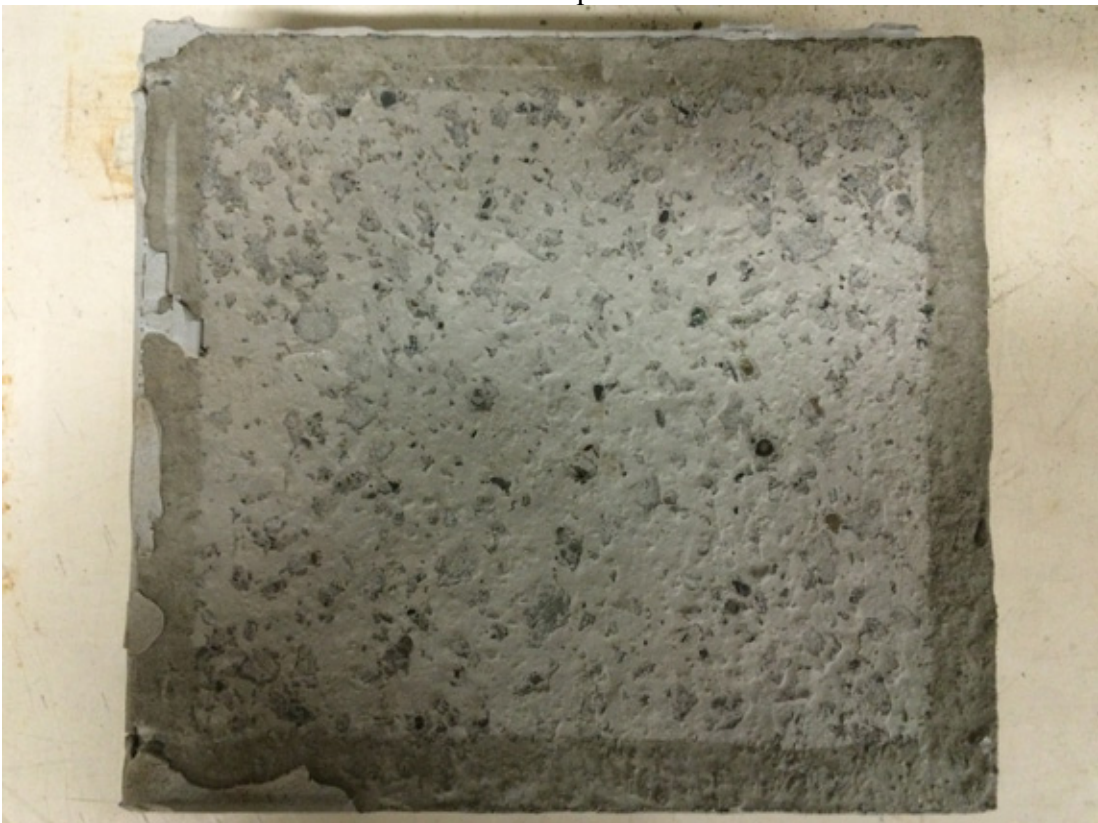


Cycle	Date	Résidu (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	15-sept.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	22-sept.-15	14	29	21	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
21	6-oct.-15	33	68	51	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
35	20-oct.-15	48	109	79	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
56	10-nov.-15	130	197	163	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6

Figure A-24 - Résultats du test d'écaillage P3-1

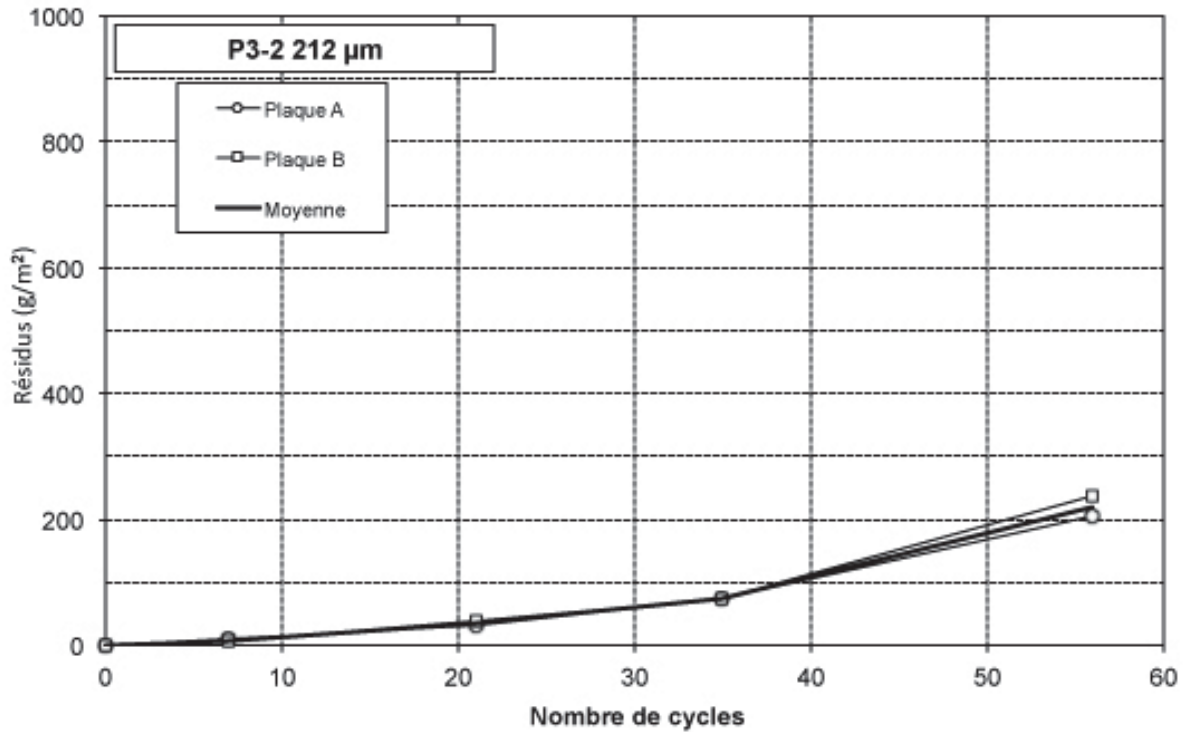


P3-1 Plaque A



P3-1 Plaque B

Les résultats à l'écaillage de P3-2 sont présentés sur la Figure A-25.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	22-sept.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	29-sept.-15	10	8	9	1a	1a	1a	100,5	100,6	100,6
21	13-oct.-15	33	39	36	1a	1a	1a	100,5	100,7	100,6
35	27-oct.-15	76	76	76	1a	1a	1a	100,6	100,7	100,6
56	17-nov.-15	204	236	220	1a	1a	1a	100,5	100,6	100,6

Figure A-25 - Résultats du test d'écaillage P3-2

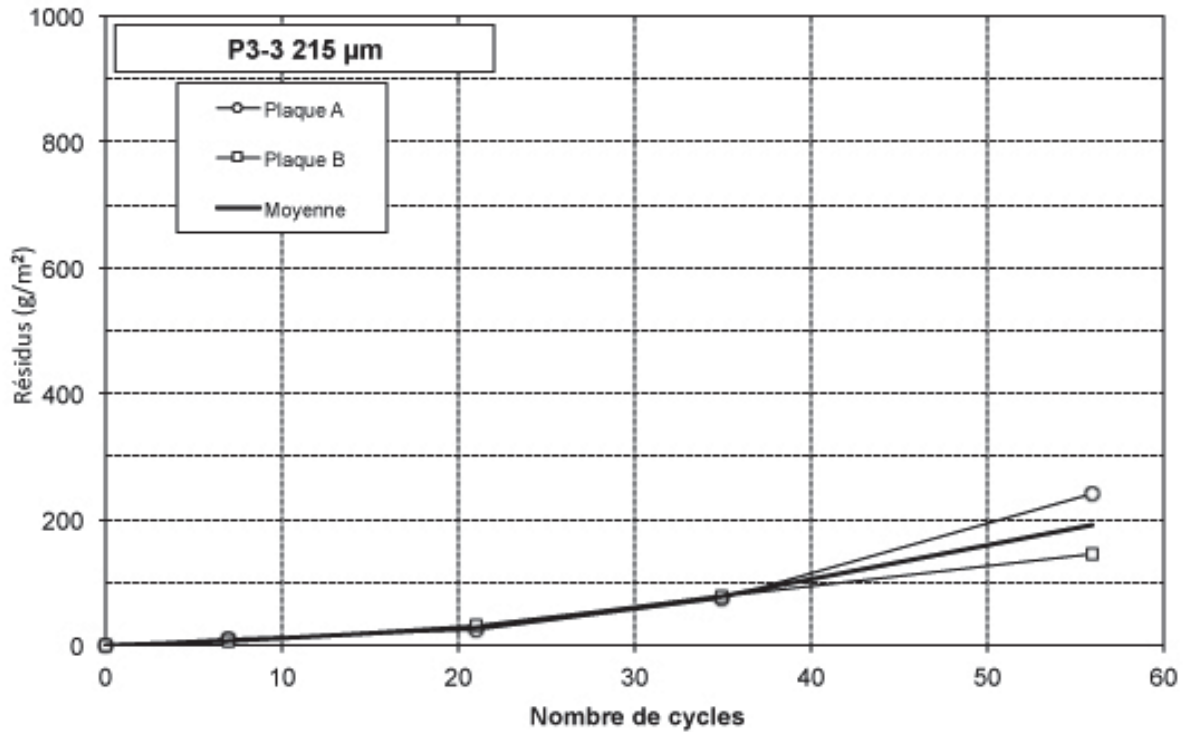


P3-2 Plaque A



P3-2 Plaque B

Les résultats à l'écaillage de P3-3s sont présentés sur la Figure A-26.

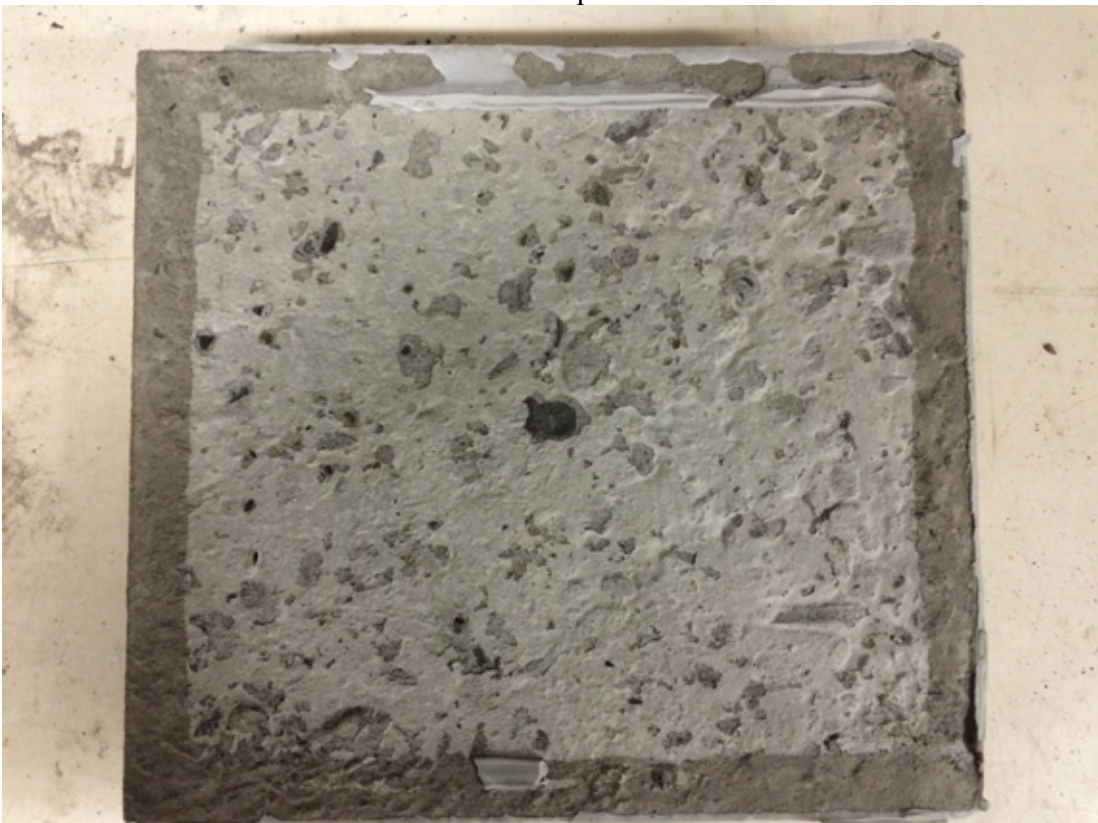


Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	29-sept.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	6-oct.-15	10	6	8	1a	1a	1a	100,5	100,4	100,4
21	20-oct.-15	25	31	28	1a	1a	1a	100,6	100,5	100,6
35	3-nov.-15	76	78	77	1a	1a	1a	100,6	100,6	100,6
56	24-nov.-15	240	145	193	1a	1a	1a	100,5	100,5	100,5

Figure A-26 - Résultats du test d'écaillage P3-3

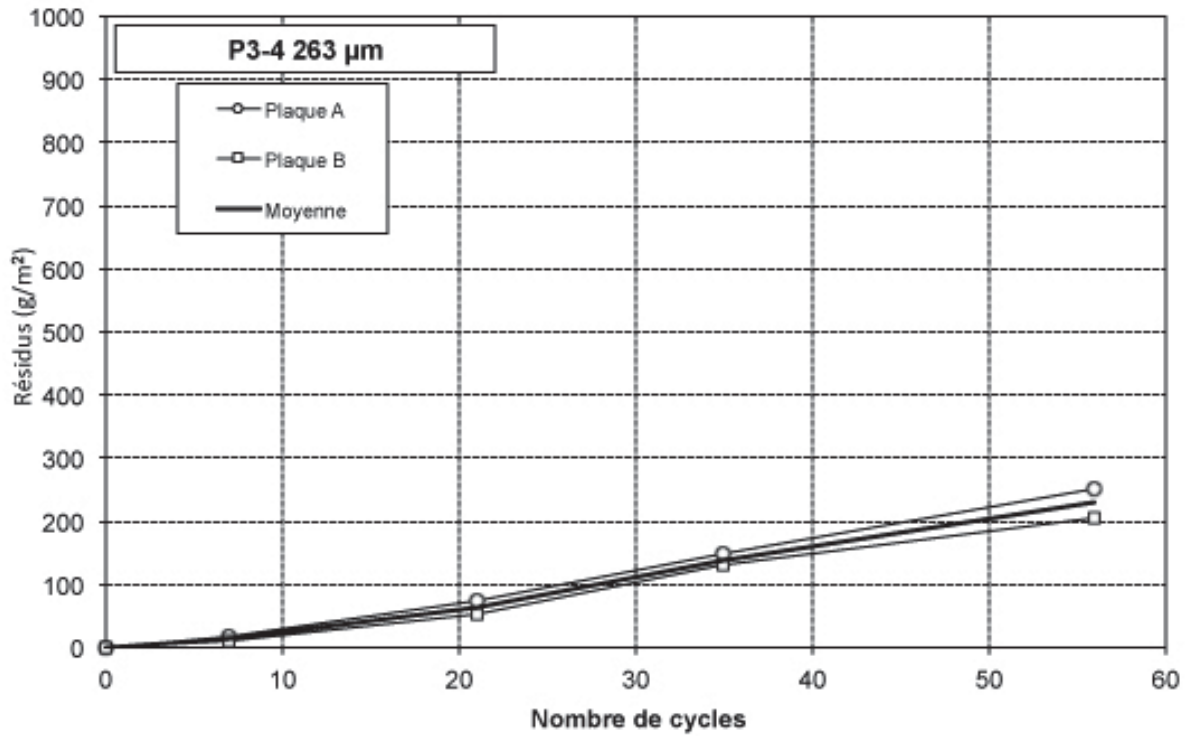


P3-3 Plaque A



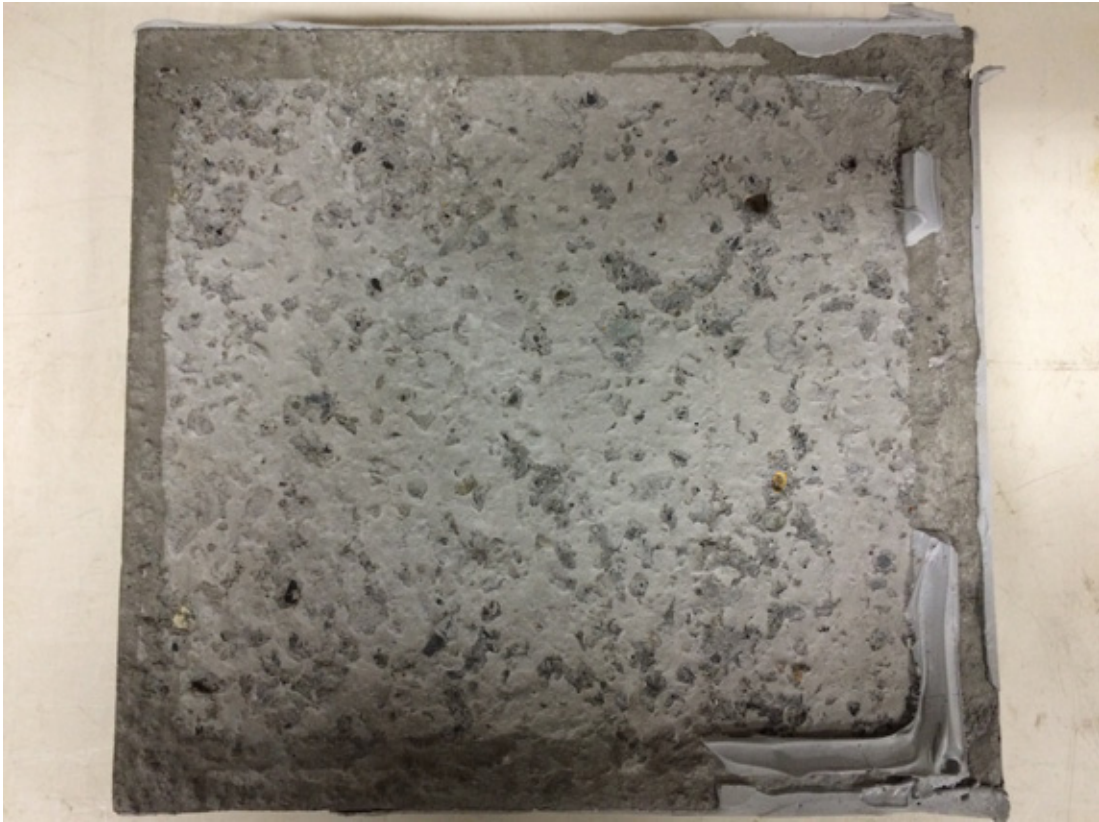
P3-3 Plaque B

Les résultats à l'écaillage de P3-4 sont présentés sur la Figure A-27.

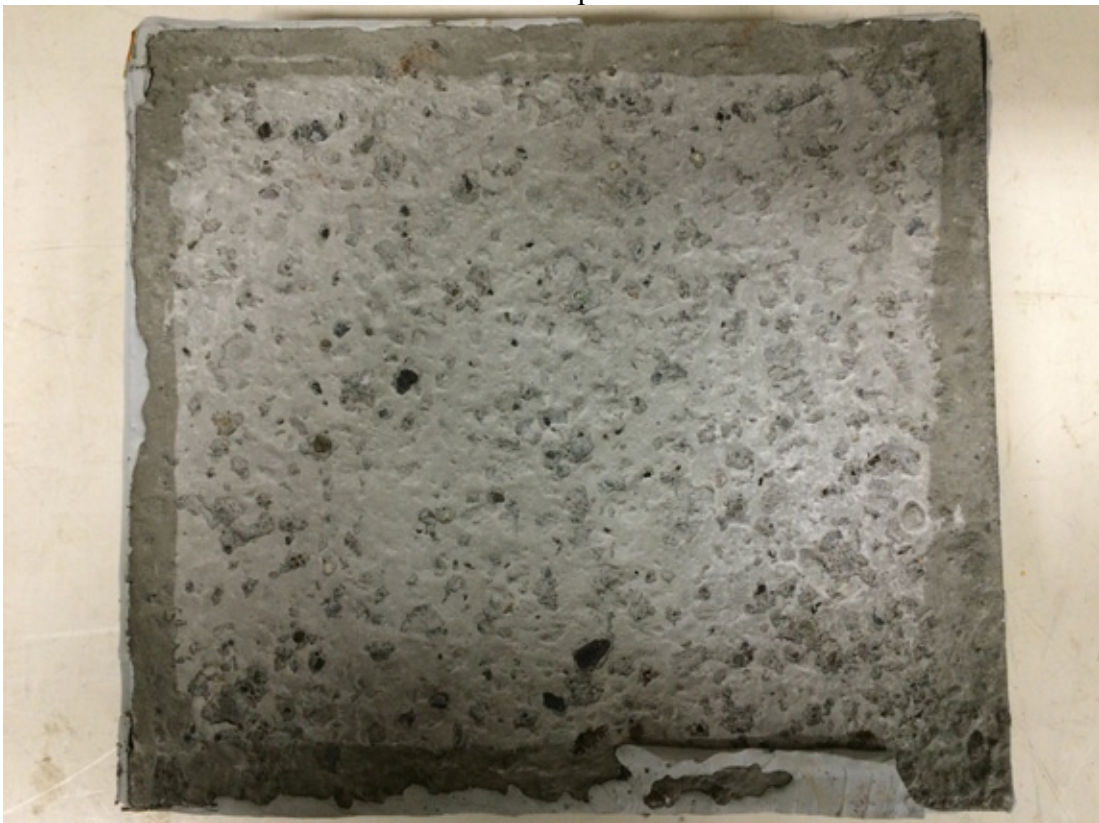


Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	1-déc.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	8-déc.-15	17	12	14	1a	1a	1a	100,7	100,7	100,7
21	22-déc.-15	76	52	64	1a	1a	1a	100,7	100,8	100,7
35	5-janv.-16	149	131	140	1a	1a	1a	100,7	100,7	100,7
56	26-janv.-16	252	206	229	1a	1a	1a	100,7	100,7	100,7

Figure A-27 - Résultats du test d'écaillage P3-4

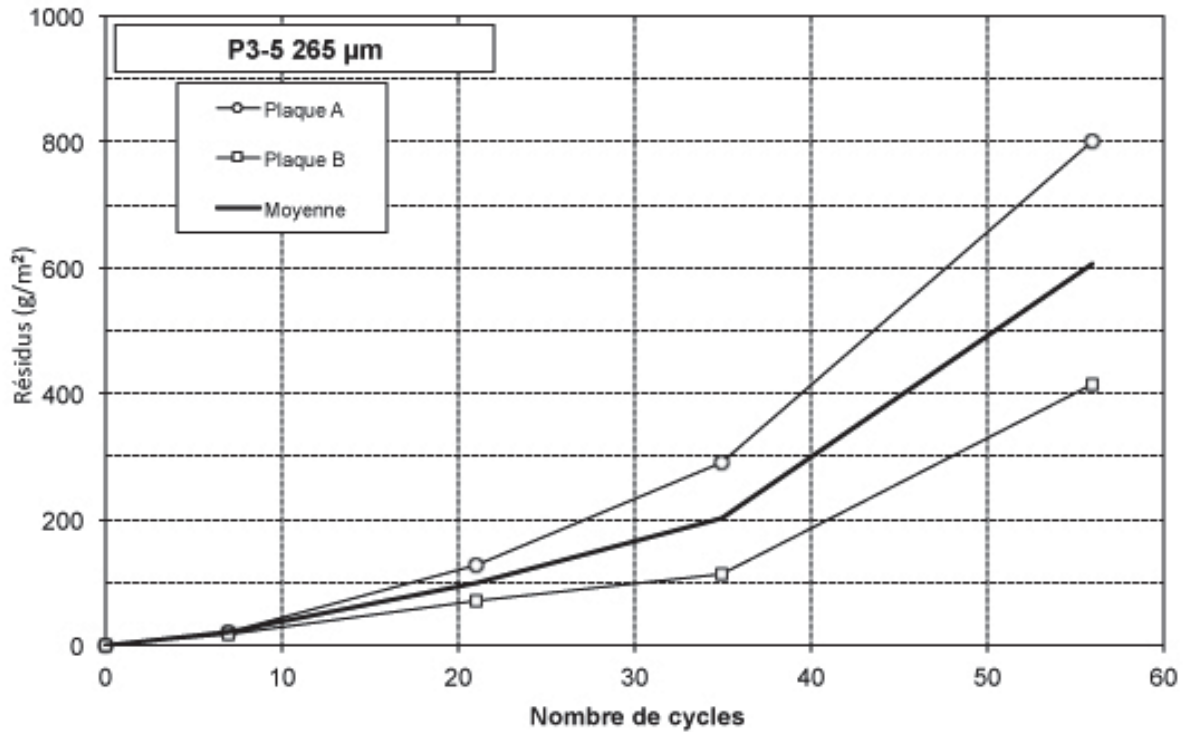


P3-4 Plaque A



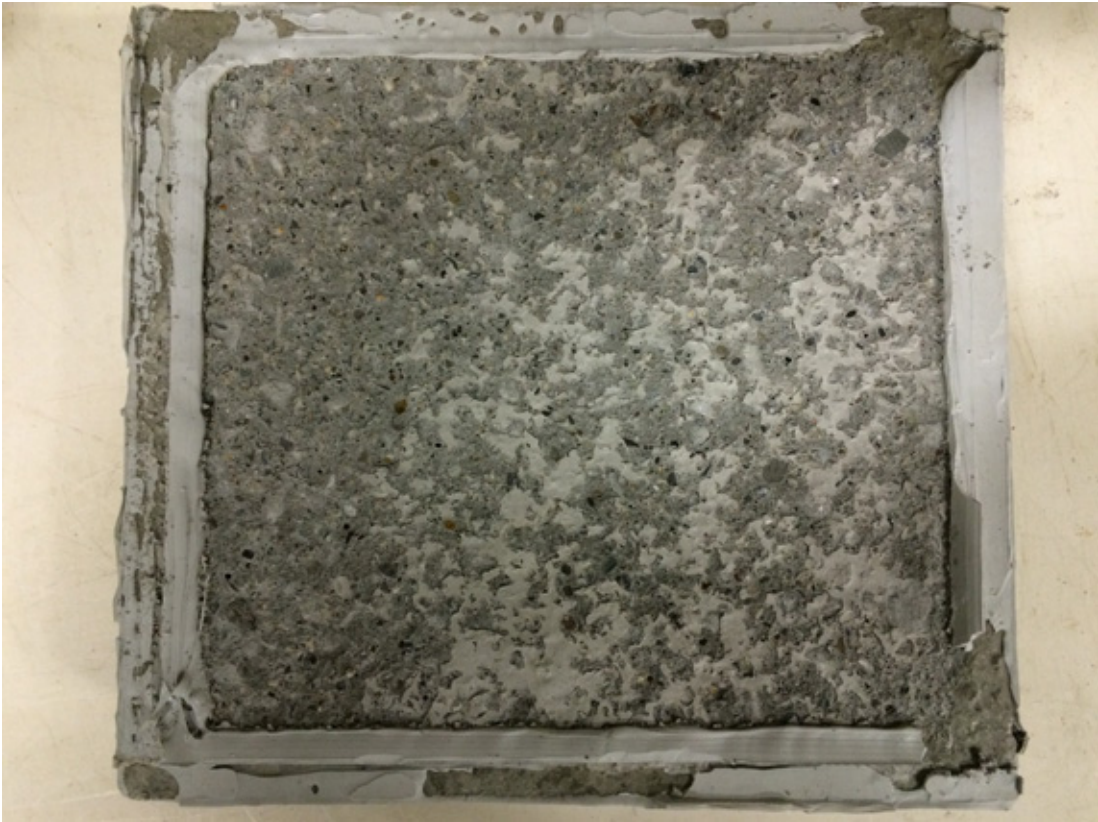
P3-4 Plaque B

Les résultats à l'écaillage de P3-5 sont présentés sur la Figure A-28.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	15-déc.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	22-déc.-15	21	19	20	1a	1a	1a	100,9	100,9	100,9
21	5-janv.-16	129	70	100	1a	1a	1a	100,9	100,9	100,9
35	19-janv.-16	289	115	202	1a	1a	1a	100,7	100,9	100,8
56	9-févr.-16	801	415	608	1a	1a	1a	100,6	100,8	100,7

Figure A-28 - Résultats du test d'écaillage P3-5

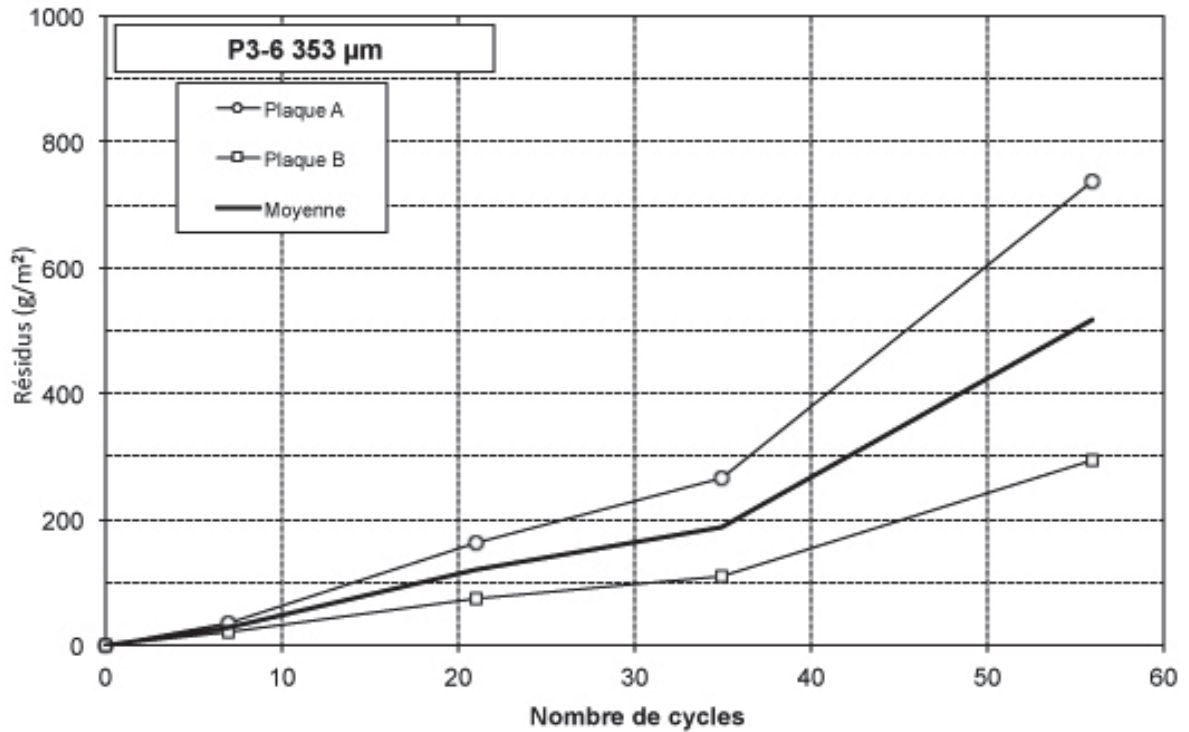


P3-5 Plaque A



P3-5 Plaque B

Les résultats à l'écaillage de P3-6 sont présentés sur la Figure A-29.



Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	15-déc.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	22-déc.-15	37	21	29	1a	1a	1a	100,9	100,8	100,9
21	5-janv.-16	163	76	119	1a	1a	1a	100,9	100,8	100,9
35	19-janv.-16	266	109	187	1a	1a	1a	100,8	100,8	100,8
56	9-févr.-16	738	296	517	1a	1a	1a	100,7	100,8	100,8

Figure A-29 - Résultats du test d'écaillage P3-6



P3-6 Plaque A



P3-6 Plaque B

A.5 Résultats détaillés de la phase 4

Les résultats à l'écaillage de GM-1 sont présentés sur la Figure A-30.

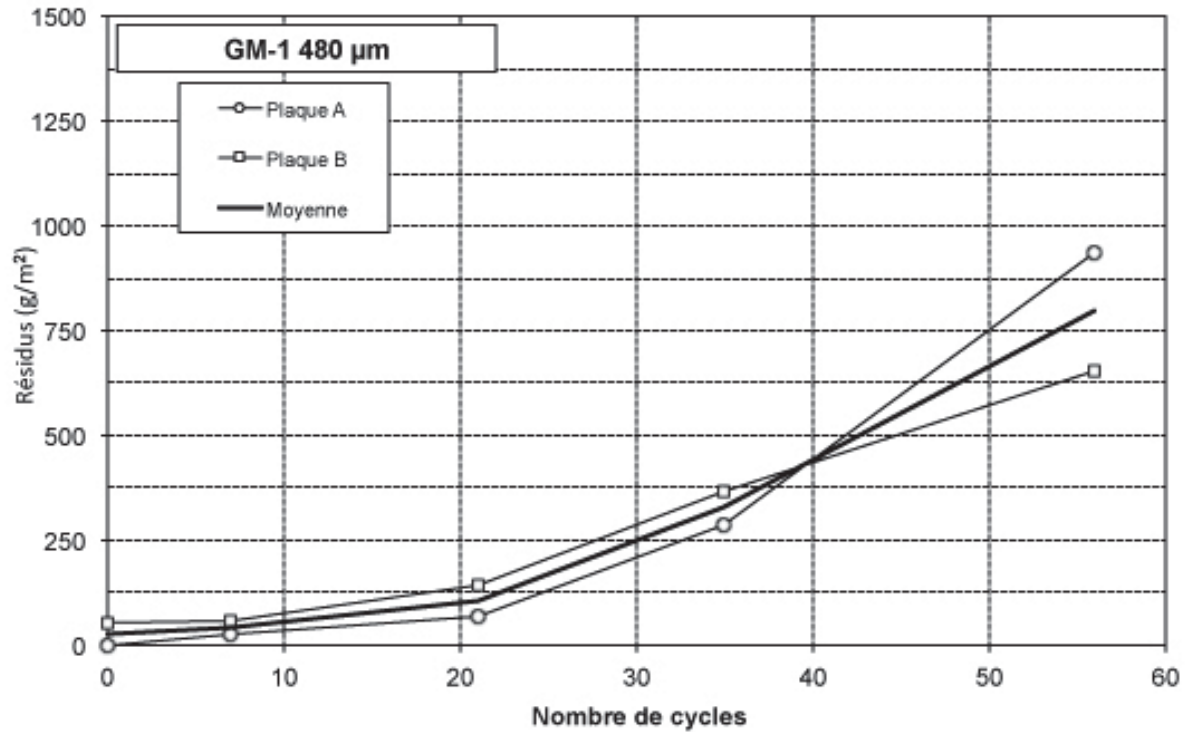
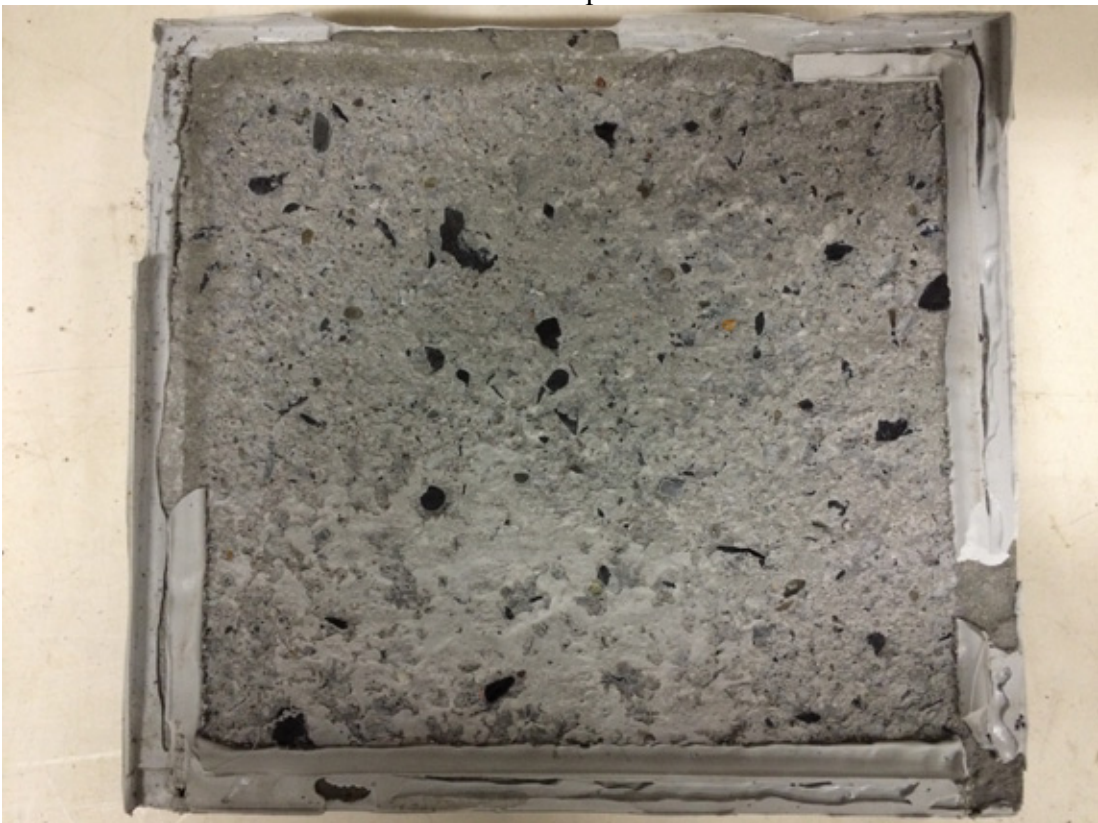


Figure A-30 - Résultats du test d'écaillage GM-1

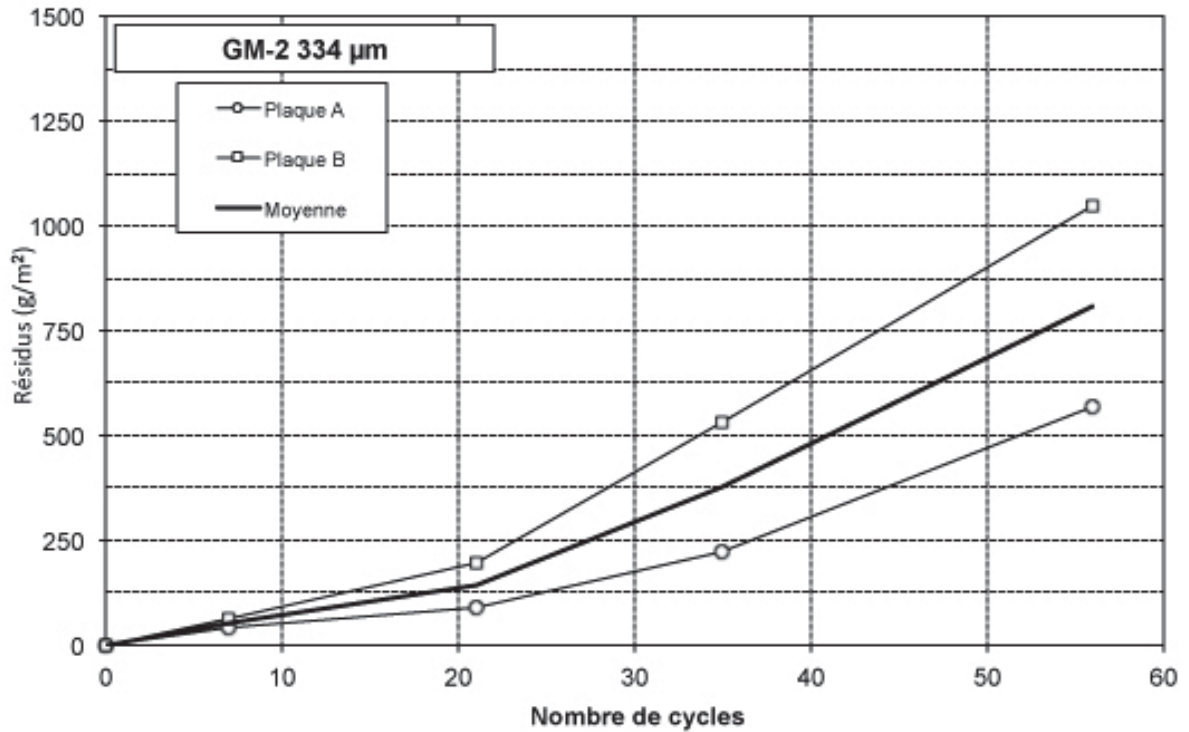


GM-1 Plaque A



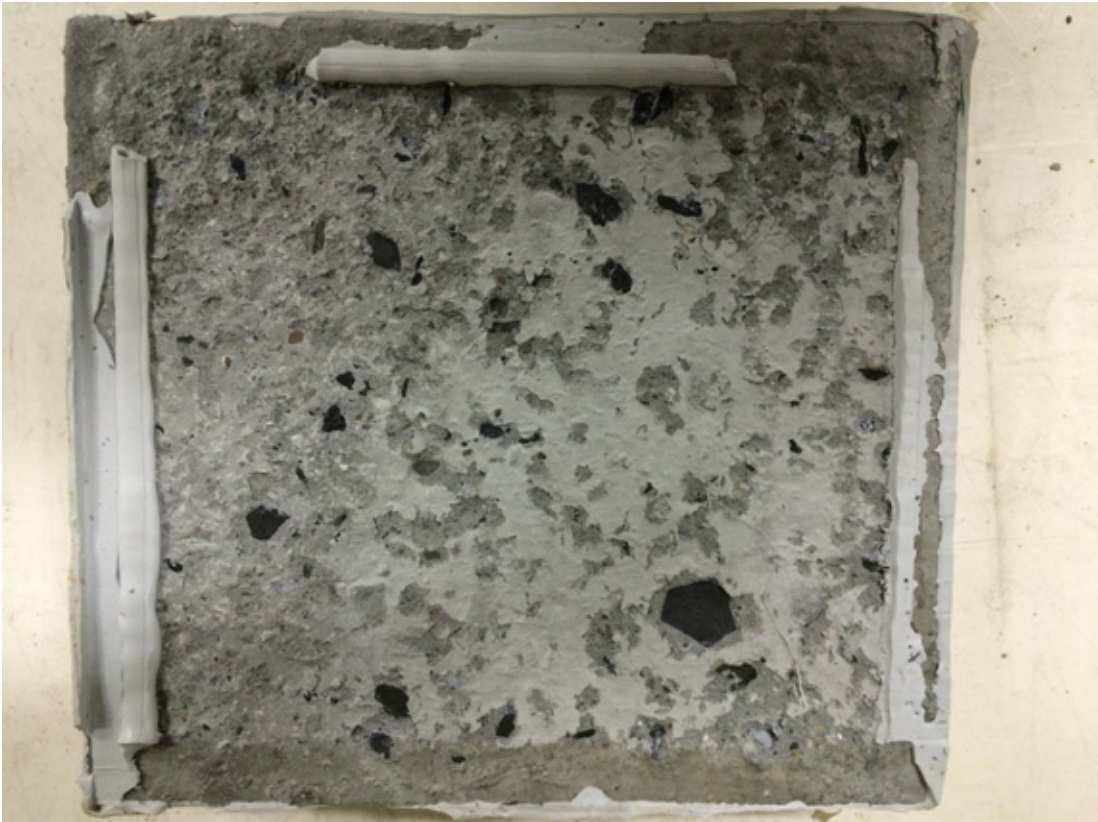
GM-1 Plaque B

Les résultats à l'écaillage de GM-2 sont présentés sur la Figure A-31.

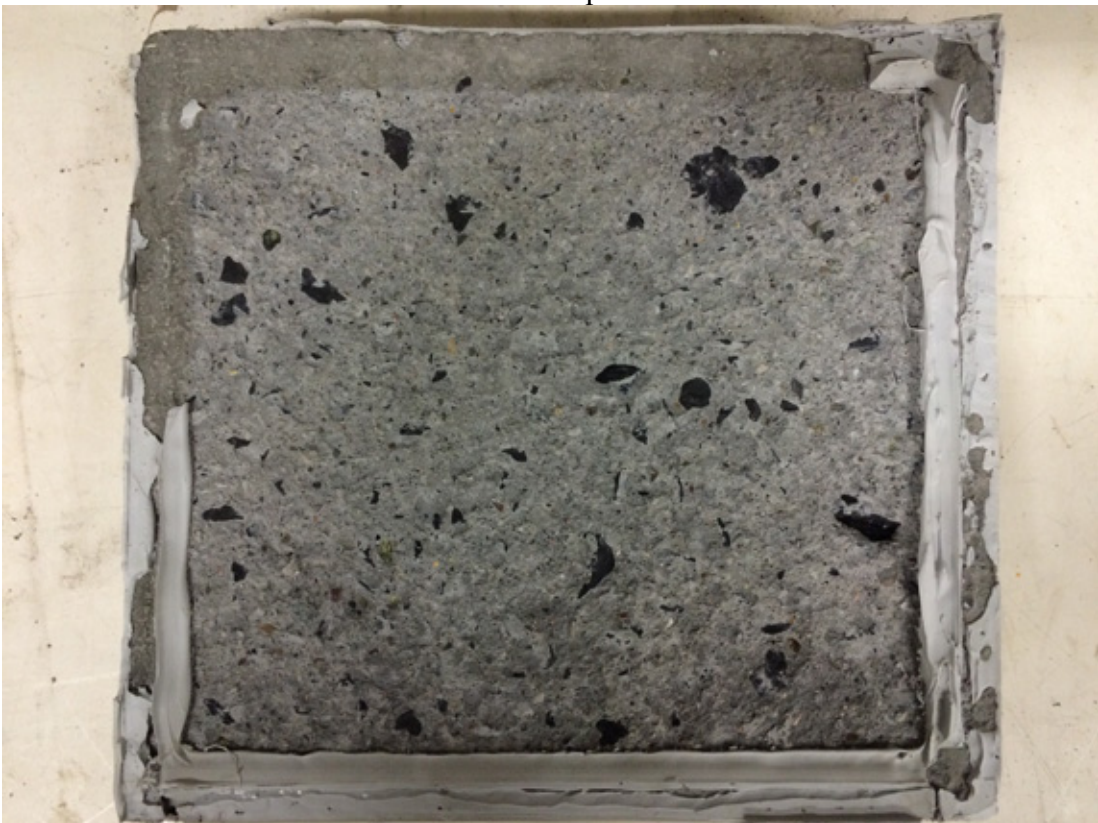


Cycle	Date	Résidus (g/m²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	29-déc.-15	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	5-janv.-16	45	64	55	3	3	3	100,8	101,0	100,9
21	19-janv.-16	93	195	144	3	3	3	100,7	100,9	100,8
35	2-févr.-16	221	530	375	3	3	3	100,8	100,8	100,8
56	23-févr.-16	570	1049	810	3	3	3	100,7	100,7	100,7

Figure A-31 - Résultats du test d'écaillage GM-2

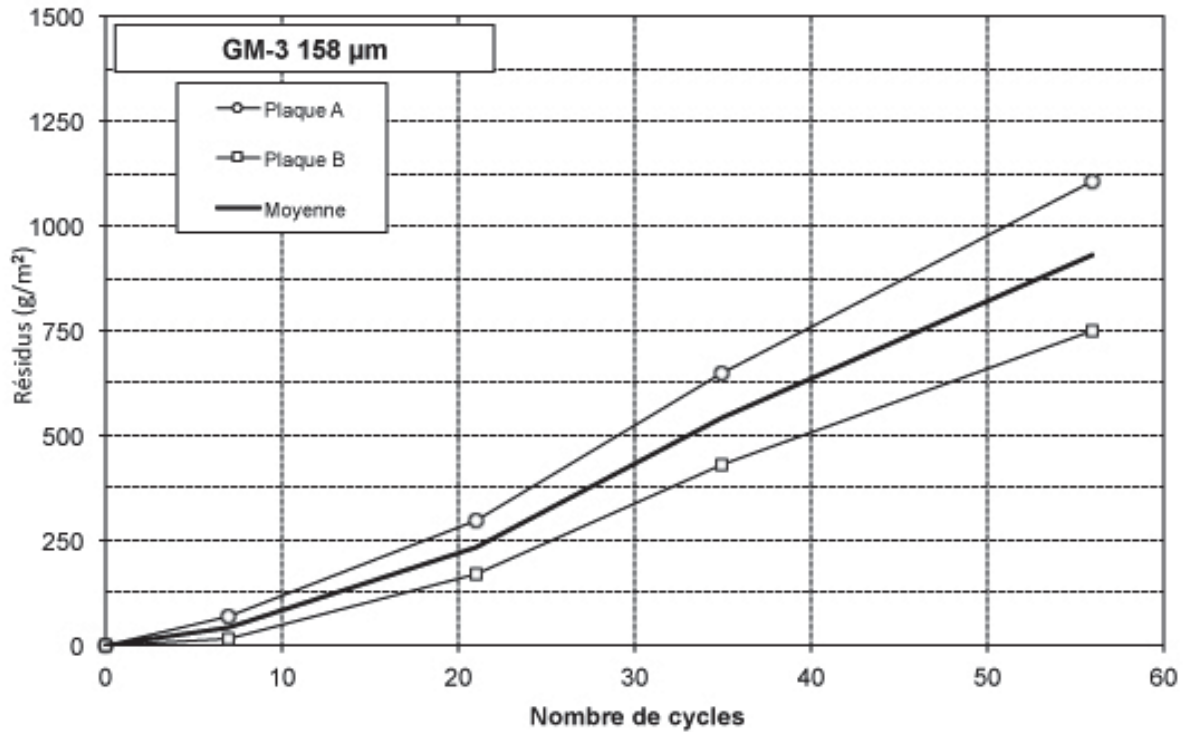


GM-2 Plaque A



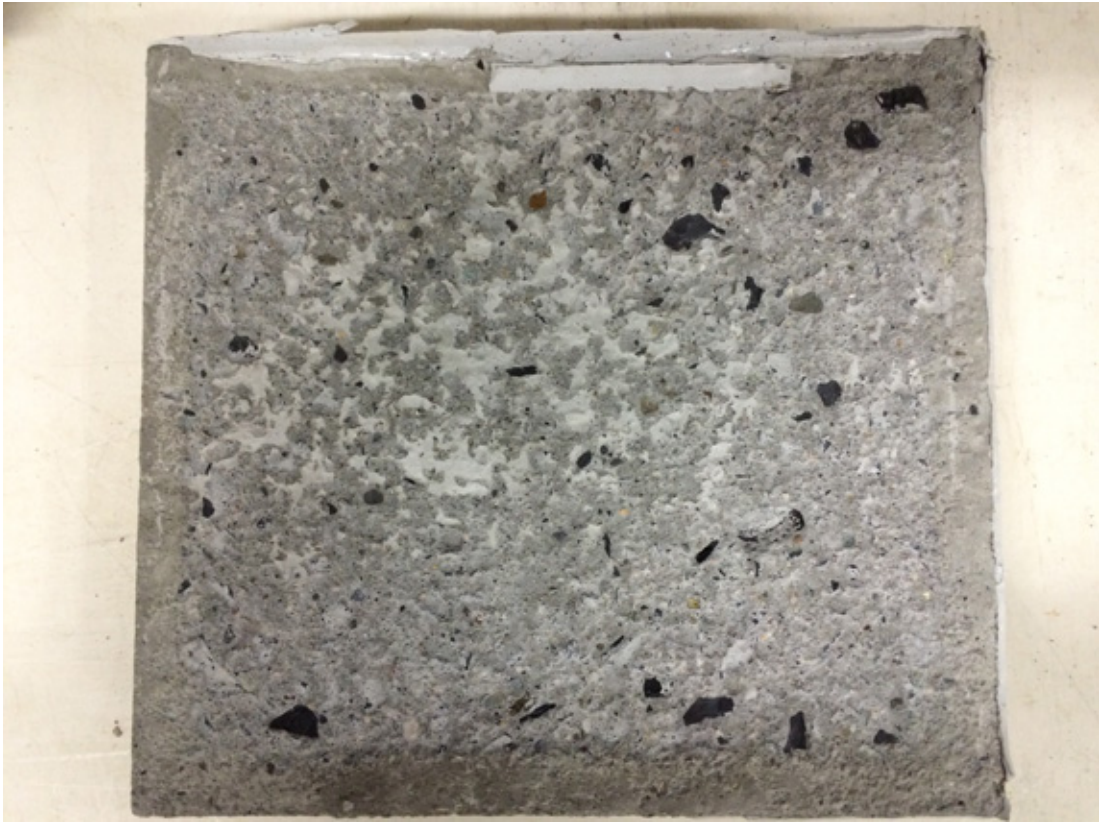
GM-2 Plaque B

Les résultats à l'écaillage de GM-3 sont présentés sur la Figure A-32.

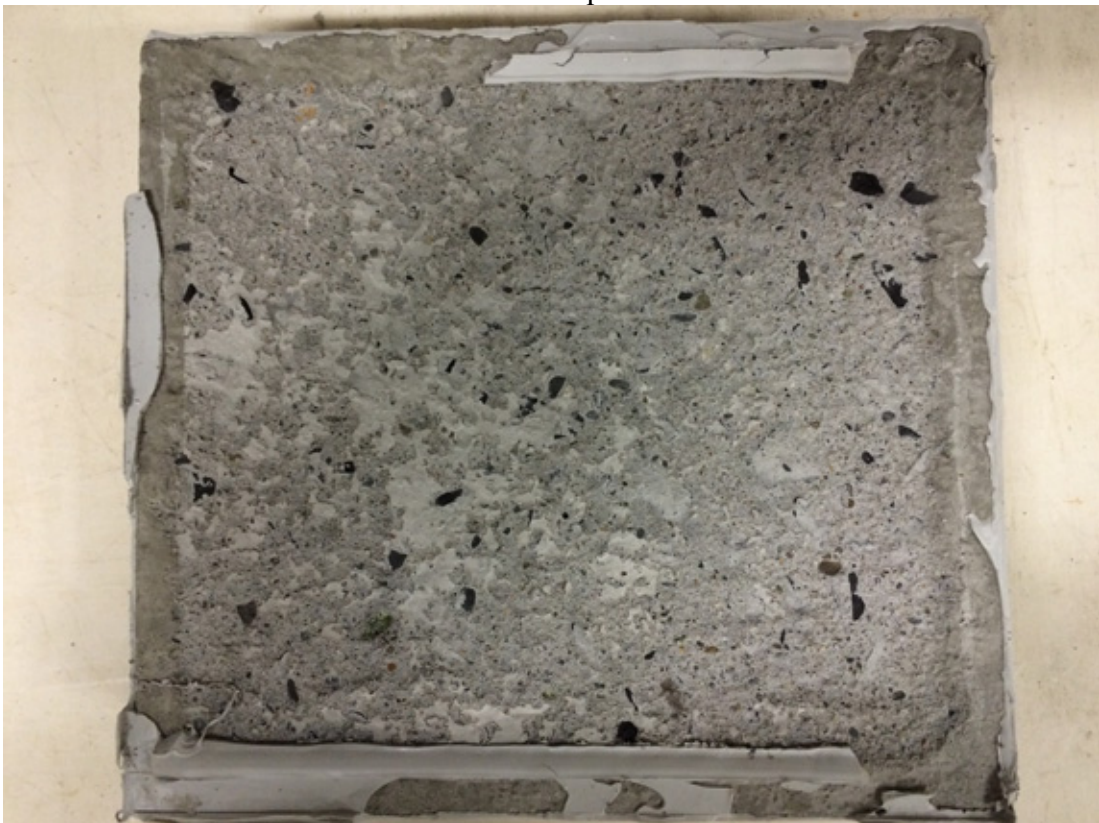


Cycle	Date	Résidus (g/m ²)			Cote			Masse plaque (%)		
		A	B	Moy	A	B	Moy	A	B	Moy
0	5-janv.-16	0	0	0	0	0	0	100,0	100,0	100,0
7	12-janv.-16	72	14	43	3	3	3	100,6	100,7	100,7
21	26-janv.-16	300	172	236	3	3	3	100,8	100,9	100,9
35	9-févr.-16	651	432	542	3	3	3	100,7	100,8	100,8
56	1-mars-16	1109	750	929	3	3	3	100,5	100,7	100,6

Figure A-32 - Résultats du test d'écaillage GM-3



GM-3 Plaque A



GM-3 Plaque B

Les résultats à l'écaillage de GM-4 sont présentés sur la Figure A-33.

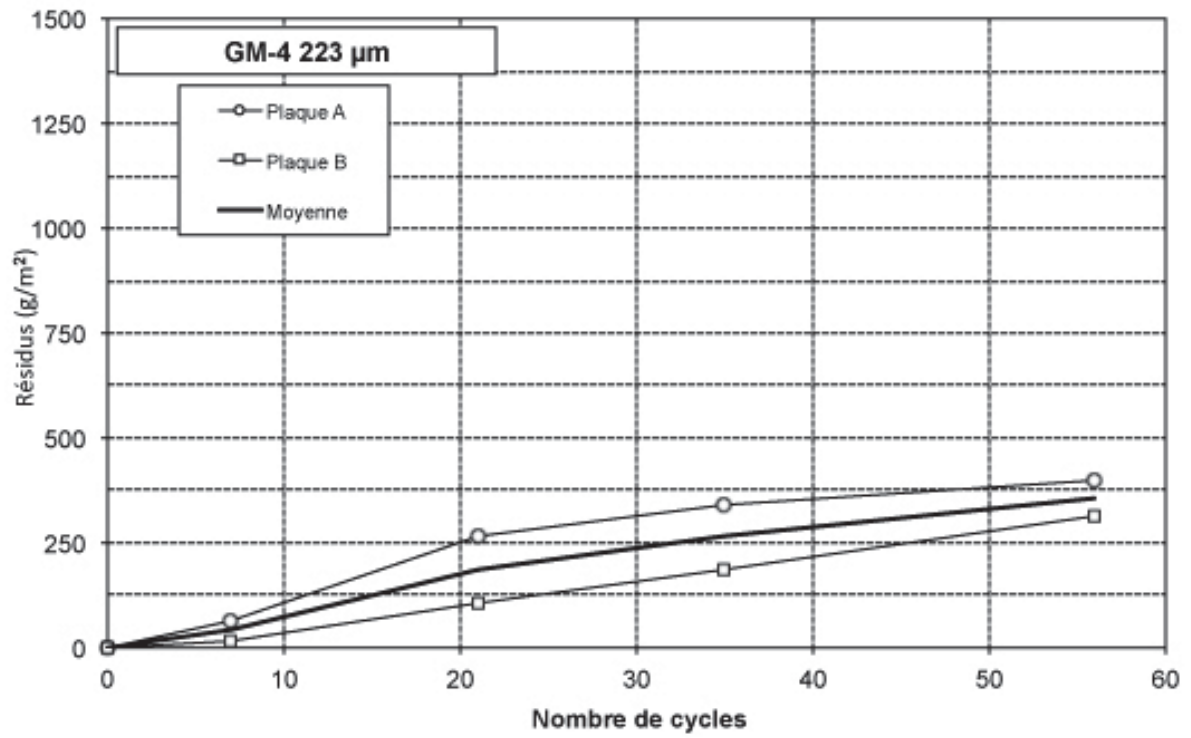
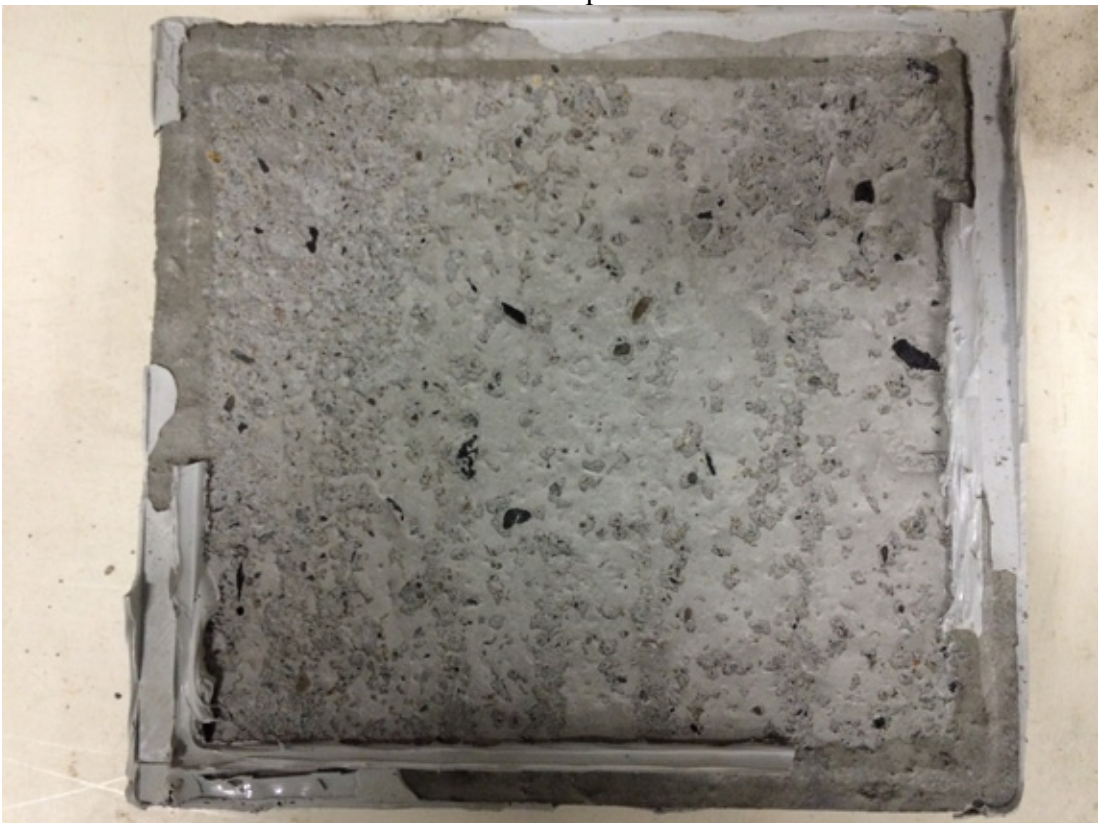


Figure A-33 - Résultats du test d'écaillage GM-4



GM-4 Plaque A



GM-4 Plaque B

A.6 Images analyse de « pop-out »



P2-1 plaque A



P2-1 plaque B



P3-4 plaque A



P3-4 plaque B



P3-6 plaque A



P3-6 plaque B



GM-2 plaque A



GM-2 plaque B



GM-3 plaque A



GM-3 plaque B



GM-4 plaque A



GM-4 plaque B

ANNEXE B Détails des matériaux

Drain Brothers Quarry Reference Aggregate

Supplied by:
Soils and Aggregates Section
Materials Engineering and Research Office
Ministry of Transportation
1201 Wilson Avenue
Downsview, Ontario, Canada M3M 1J8
Phone: (416) 235-3735

The data given below were developed in a multi-laboratory study with participants ranging from 12 labs in LA Abrasion Test to 106 in Relative Density and Absorption.

Los Angeles Abrasion

MTO Test Method LS-603
Mean Loss 26.0%; Range 23.2% - 28.8%

Relative Density and Absorption (Coarse Aggregate)

MTO Test Method LS-604
Mean Relative Density 2.690; Range 2.681 - 2.699
Mean Absorption 0.39%; Range 0.29% - 0.49%

Magnesium Sulphate Soundness

MTO Test Method LS-606
Mean Loss 8.9%; Range 4.9% - 12.9%

Unconfined Freeze-Thaw

MTO Test Method LS-614
CSA Test Method A23.2-24A
Mean Loss 11.9%; Range 8.5% - 15.3%

Micro-Deval Abrasion

MTO Test Method LS-618
CSA Test Method A23.2-24A
AASHTO Test Method T 327
ASTM Test Method D6928
Mean Loss 13.1%; Range 11.4% - 14.8%