

LA RÉSISTANCE À L'ÉCAILLAGE DES BÉTONS CONTENANT DES AJOUTS CIMENTAIRES

Marie-Hélène Tremblay Marc Jolin Xavier Willem Jacques Marchand

Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB),
Université Laval, Québec, Canada

Article initialement publié dans le compte-rendu de conférence sur les PROGRÈS DANS LE DOMAINE DU BÉTON, *Boucherville, 30 novembre et 1^{er} décembre 2005*, avec l'aimable autorisation de l'ACI section du Québec et de l'est de l'Ontario.

RÉSUMÉ

L'évaluation en laboratoire de la résistance à l'écaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires cause beaucoup de soucis aux intervenants du génie civil. Les bétons contenant des ajouts cimentaires subissent généralement d'importantes dégradations lors de l'essai normalisé de résistance à l'écaillage alors que le comportement en service de ces mêmes bétons s'avère souvent satisfaisant. Une étude a été réalisée pour comprendre l'origine des différences entre le comportement en laboratoire et celui observé en chantier. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet plus étendu dont les objectifs principaux sont de comprendre le rôle des ajouts cimentaires dans les mécanismes de dégradation par écaillage et de proposer des outils permettant une prédiction fiable du comportement des bétons contenant des ajouts soumis au gel-dégel en présence de sels fondants. La première partie de cet article est consacrée à la présentation des particularités de chacune des étapes du projet. La seconde partie présente et discute les résultats préliminaires obtenus dans le volet du projet visant à déterminer l'influence de la composition du mélange et de la méthode de mûrissement sur l'évaluation de la résistance à l'écaillage en laboratoire. Sept mélanges contenant différentes quantités de laitier de haut-fourneau, de cendres volantes et de fumée de silice ont été mûris selon quatre techniques couramment utilisées en chantier avant d'être soumis à l'essai d'écaillage ASTM C 672. Les résultats montrent que la méthode de cure et la composition du mélange ont une influence combinée sur la résistance à l'écaillage. Des conditions telles que le drainage de l'eau de ressuage à la base du moule ou l'application d'un agent de cure liquide ont des effets sur la résistance à l'écaillage qui dépendent de la composition du mélange. Dans la continuité de ce projet, des essais de sorptivité seront réalisés sur les mêmes types de surfaces dans le but d'établir une relation entre la résistance à l'écaillage et les propriétés d'absorption de surface du béton.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, l'incorporation d'ajouts cimentaires tels que les cendres volantes et les laitiers de haut-fourneau dans les mélanges de béton est une pratique largement répandue et documentée. En plus d'améliorer plusieurs propriétés du béton, le remplacement partiel du ciment par des ajouts cimentaires offre plusieurs avantages économiques et environnementaux. La réduction de la quantité de ciment requise entraîne une baisse des coûts de production, de la consommation énergétique et des émissions polluantes reliés à la fabrication du ciment Portland. De plus, l'incorporation des cendres volantes et des laitiers de haut-fourneau dans le béton est un usage sain et permanent de ces résidus industriels.

Malgré ces nombreux avantages, l'évaluation de la résistance à l'écaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires suscite beaucoup de questionnement auprès des chercheurs. La majorité des bétons contenant des ajouts cimentaires ont tendance à subir d'importantes dégradations lorsqu'ils sont soumis à l'essai d'écaillage en laboratoire. Toutefois, plusieurs de ces mélanges montrent une résistance à l'écaillage très satisfaisante en chantier [1-5]. De plus, les études inter-laboratoires présentent souvent des résultats variables. Ces observations suscitent de la méfiance face aux ajouts cimentaires et limitent leur utilisation dans les structures de béton soumises aux sels fondants en conditions hivernales.

Les connaissances actuelles ne permettent pas d'expliquer les modifications du comportement à l'écaillage que causent les ajouts cimentaires incorporés au béton. La représentativité de l'essai normalisé d'écaillage est questionnée puisque ce dernier discrédite des mélanges qui résistent convenablement lorsqu'ils sont exposés à des conditions naturelles. Il est donc impératif de comprendre les phénomènes responsables de la dégradation par écaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires afin de mettre au point des outils permettant une prédiction efficace de leur comportement en service.

PRÉSENTATION DU PROJET

L'objectif principal du projet de recherche est de comprendre l'effet négatif des ajouts cimentaires sur le comportement à l'écaillage des bétons tel qu'évalué en laboratoire. Le programme de recherche comporte deux phases. La première phase concerne le comportement à l'écaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires exposés à des conditions naturelles. Sept mélanges de béton mûris selon quatre techniques différentes ont été utilisés pour la fabrication de trottoirs à Montréal en 2002. Un rapport présentant les résultats de cette phase a été publié par CANMET en octobre 2004 [6].

La seconde phase du projet vise la compréhension de l'effet des ajouts cimentaires sur le comportement du béton soumis à des cycles de gel-dégel en présence de sels fondants et le développement d'une procédure fiable pour l'évaluation de sa résistance à l'écaillage. Le projet a été divisé en cinq tâches qui étudient la question selon trois axes principaux :

- L'étude de l'effet des ajouts cimentaires sur la microstructure et sur la formation de la glace
- La compréhension de l'origine des différences entre le comportement en chantier et en laboratoire
- L'identification des paramètres responsables de la variabilité des résultats

Tâche 1 : Influence des différents paramètres de l'essai d'écaillage

La première tâche est consacrée à l'évaluation de l'influence des caractéristiques des cycles de gel-dégel sur la résistance à l'écaillage. L'essai ASTM C 672 a souvent été critiqué pour son manque de précision [7]. Selon les équipements dont ils disposent, les différents laboratoires exercent un contrôle plus ou moins rigoureux sur des paramètres tels que la température minimale atteinte, le taux de gel et la période pendant laquelle l'échantillon est maintenu gelé. Plusieurs auteurs affirment que ces paramètres peuvent jouer un rôle important sur la résistance à l'écaillage [7-9]. La variabilité des résultats inter-laboratoires pourrait être en partie expliquée par les différences dans la procédure expérimentale et par les limites des équipements utilisés. L'influence de ces caractéristiques sur la résistance à l'écaillage sera donc évaluée sur des surfaces sciées pour trois mélanges. Les paramètres évalués seront le taux de gel, la température minimale et la longueur de la période de gel.

Tâche 2 : Influence de la composition du mélange et de la méthode de cure

Cette partie du projet vise à identifier l'origine des différences entre le comportement évalué en laboratoire et celui observé en chantier. Plusieurs études montrent que les opérations de finition de surface et de mûrissement jouent un rôle primordial sur la résistance à l'écaillage [1,8,11]. Les conditions de mise en place et de mûrissement en chantier sont différentes de celles généralement adoptées pour les essais en laboratoire. Plusieurs auteurs suggèrent l'existence d'une couche poreuse en surface de faible durabilité qui pourrait être responsable des dégradations importantes

observées lors de l'essai d'écaillage [1,4,5,8,10]. La formation de cette couche serait due au ressuage favorisé en laboratoire par l'absence de vent et de soleil ainsi que par l'imperméabilité du moule empêchant le drainage de l'eau de ressuage par la base.

Alors que l'utilisation d'une toile de jute humide est réputée être la méthode de cure la plus efficace pour l'obtention de bonnes propriétés du béton en chantier, plusieurs auteurs rapportent que l'application d'un agent de cure chimique peut être bénéfique pour la résistance à l'écaillage [1,5,7,8,10]. Les échantillons fabriqués en laboratoire seront donc mûris selon les quatre procédés de cure couramment utilisés en chantier décrits dans le tableau 1.

Tableau 1: Identification et description des méthodes de mûrissement

Identification	Description
H	Toile de jute humide pendant deux jours
A	Application d'un agent de cure liquide immédiatement après le ressuage
HA	Toile de jute humide pendant 24h suivi de l'application d'un agent de cure liquide
GA*	Utilisation d'une membrane géotextile à la base du moule tel que suggéré par la norme BNQ-2621-900-1 et application d'un agent de cure liquide immédiatement après le ressuage

* Cette technique imite une base granulaire et facilite le drainage de l'eau à la base du moule, diminuant ainsi l'accumulation d'eau de ressuage en surface

Les échantillons seront soumis à l'essai d'écaillage ASTM C 672. L'essai sera réalisé sur les surfaces truées et les cycles de température seront soigneusement contrôlés. Les sept mélanges sélectionnés sont décrits dans le tableau 2.

Tableau 2: Identification et description des mélanges

Identification	Description
Référence	Ciment Type 10 + 25% de ciment + fumée de silice (total ~2% de fumée de silice)
Laitier-25	Ciment Type 10 + 25% de laitier de haut-fourneau
Cendre-25	Ciment Type 10 + 25% de cendres volantes
Laitier-35	Ciment Type 10 + 35% de laitier de haut-fourneau
Cendre-35	Ciment Type 10 + 35% de cendres volantes
Ternaire-L	Ciment ternaire ~20% de laitier de haut-fourneau + ~3% de fumée de silice
Ternaire-C	Ciment ternaire ~25% de cendres volantes + ~3% de fumée de silice

Pour fins de comparaison, les mélanges réalisés en laboratoire conservent le même rapport eau-liant, le même pourcentage de pâte et respectent les mêmes spécifications relatives à l'affaissement et à la teneur en air que les mélanges utilisés en chantier lors de la première phase du projet.

Une attention particulière sera portée sur les propriétés de la couche de surface au moyen d'un essai de sorptivité développé à l'Université de Sherbrooke. Selon les travaux de Bégué et Gagné, il existerait une relation entre la résistance à l'écaillage et la sorptivité du béton [12]. Puisque la microstructure du béton de peau influence la sorptivité, cette dernière serait un indicateur des

propriétés de surface responsables de la résistance à l'écaillage [13]. Les auteurs observent que lorsque la sorptivité d'une surface de béton est plus élevée, l'écaillage est plus important (fig. 1). Cette relation permettrait éventuellement de prédire le comportement à l'écaillage en fonction des propriétés d'absorption de surface du béton.

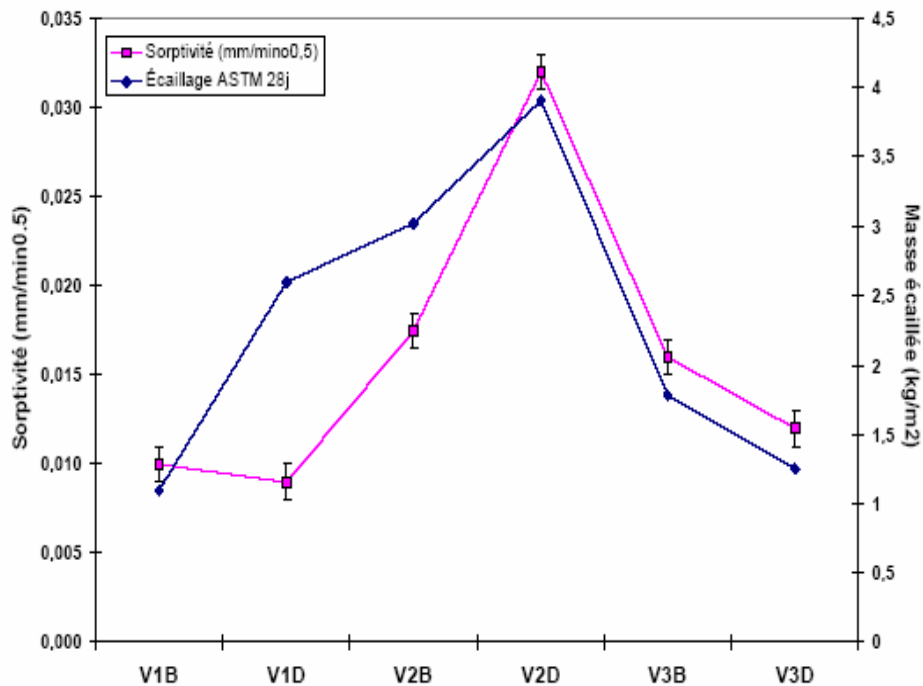


Figure 1: Exemple de la relation observée entre la sorptivité et l'écaillage (P. Bégué et R. Gagné [12])

Tâche 3 : Influence des ajouts cimentaires sur la microstructure et sur la formation de la glace

Cette phase du projet propose une approche plus fondamentale du problème en étudiant l'influence des ajouts cimentaires sur la structure poreuse du béton. La couche de surface de faible durabilité pourrait être plus profonde pour les bétons contenant des ajouts cimentaires [8]. Une caractérisation de la structure poreuse du béton de surface sera réalisée à l'aide d'essais tels que la calorimétrie à basse température et la porosimétrie au mercure. Des observations au microscope à balayage électronique permettront d'étudier la microstructure. Afin de relier ces caractéristiques avec le comportement à l'écaillage, ces essais seront réalisés sur les mélanges Référence, Laitier-25 et Cendre-25 préparés lors de la tâche 2 (tableau 2).

Puisque certaines études ont montré que les ajouts cimentaires réduisent également la résistance à l'écaillage d'une surface sciée [8], les mêmes essais seront conduits sur les trois mélanges préparés lors de la tâche 1.

Tâche 4 : Étude de la reproductibilité inter-laboratoire

L'objectif de cette portion de l'étude est de valider la reproductibilité d'une procédure d'essai basée sur la norme ASTM C 672 qui inclura les améliorations suggérées suite aux tâches précédentes. Des plaques seront fabriquées avec les sept mélanges décrits à la tâche 2 et seront testées dans six laboratoires différents (Université Laval, Université de Sherbrooke, Université de Toronto, CANMET, Ministère des transports du Québec, Ville de Montréal).

Tâche 5 : Analyse globale et recommandations

Une analyse globale de tous les aspects du projet sera réalisée afin de publier un rapport contenant des recommandations sur l'utilisation des ajouts cimentaires dans les bétons sujets à l'écaillage.

AVANCEMENT DES TRAVAUX : TÂCHE 2

Les résultats qui seront présentés sont issus de la réalisation des travaux de la tâche 2. Les essais d'écaillage sur tous les mélanges prévus au programme sont complétés et l'analyse des résultats est en cours. Il est à noter que deux mélanges de référence ont été confectionnés. Les essais de caractérisation sont partiellement réalisés et les essais de sorptivité sont actuellement en cours. Les résultats et les conclusions finales relatives à cette partie du projet seront disponibles au début de l'année 2006.

MÉTHODOLOGIE

Matériaux

Les matériaux utilisés pour la confection des mélanges sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Matériaux utilisés pour la fabrication des mélanges

	<i>Référence-1</i>	<i>Référence-2</i>	<i>Cendre-25</i>	<i>Cendre-35</i>	<i>Ternaire-C</i>	<i>Laitier-25</i>	<i>Laitier-35</i>	<i>Ternaire-L</i>
Matériaux cimentaires								
Ciment Portland Type 10	X	X	X	X		X	X	
Ciment + Fumée de silice	X	X						
Laitier de haut-fourneau Grade 100						X	X	
Cendres volantes			X	X				
Ciment ternaire à base de laitier								X
Ciment ternaire à base de cendre					X			
Adjuvants								
Agent entraîneur d'air Micro-Air	X	X				X	X	X
Agent entraîneur d'air Airextra			X	X	X			
Réducteur d'eau Pozz-200-N	X	X				X	X	X
Réducteur d'eau Eucon DX			X	X	X			

Tous les mélanges ont été réalisés avec les mêmes proportions de granulats de type calcaire provenant de la même carrière dans la région de Québec. Les spécifications ayant servi de base à la formulation des mélanges sont résumées dans le tableau 4.

Tableau 4: Spécifications pour la formulation des mélanges

Caractéristique	Valeur visée
Rapport eau/liant	0,42
Pourcentage de pâte	30%
Pourcentage d'air	5-8%
Affaissement	60-90 mm
Résistance minimale à la compression à 28 jours	32 MPa
Pourcentage de sable*	40%
Pourcentage de pierre 5-14 mm*	45%
Pourcentage de pierre 10-20 mm*	15%

* Par rapport à la masse totale des granulats

Confection et mûrissement des éprouvettes

Tous les mélanges ont été fabriqués d'après la séquence de malaxage adoptée par le CRIB. Les éprouvettes destinées à l'essai d'écaillage ont été fabriquées selon la procédure définie par la norme ASTM C 672 et finies avec une truelle de bois. Les quatre conditions de cure décrites au tableau 1 ont été appliquées. Les informations relatives au temps de finition sont résumées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Temps écoulé après le contact eau-ciment pour les différentes opérations

	<i>Référence-1</i>	<i>Référence-2</i>	<i>Cendre-25</i>	<i>Cendre-35</i>	<i>Ternaire-C</i>	<i>Laitier-25</i>	<i>Laitier-35</i>	<i>Ternaire-L</i>
Début du moulage	55 min	45 min	45 min	45 min	55 min	50 min	45 min	60 min
Fin de la finition	1h20	1h15	1h05	1h20	1h25	1h20	1h15	1h35
Début de la cure	5h35	4h45	5h15	5h15	5h	5h15	5h20	3h
Démoulage	-	47h	50h	48h	45h	48h	48h	48h

Essais de caractérisation

Des essais de caractérisation ont été réalisés sur le béton à l'état frais et à l'état durci. En plus des essais d'affaissement et de teneur en air, les mélanges ont été soumis à l'essai de ressuage ASTM C 232. Le ressuage était toutefois trop faible pour que des résultats puissent être obtenus selon cette procédure. Les éprouvettes destinées aux essais à l'état durci ont été placées dans une chambre à 100% d'humidité relative jusqu'à la réalisation des essais. La résistance à la compression a été évaluée sur des éprouvettes âgées de 7 jours, 28 jours et 90 jours. L'essai de porosité accessible à l'eau ASTM C 642 a été réalisé sur des échantillons âgés de 28 jours et de 56 jours. La caractérisation du réseau de bulles d'air selon la norme ASTM C 457 sera réalisée sous peu. Les résultats disponibles à ce jour sont résumés dans le tableau 6.

Tableau 6: Propriétés des mélanges

		Référence-1	Référence-2	Cendre-25	Cendre-35	Ternaire-C	Laitier-25	Laitier-35	Ternaire-L
Affaissement (mm)		55	70	70	90	60	120	70	60
Teneur en air (%)		6,6	6,6	5,2	6,0	5,9	8,0	6,5	5,5
Résistance en compression (MPa)	7 jours	39	40	29	23	30	26	27	40
	28 jours	47	46	32	29	42	45	51	45
	90 jours	55	-	44	40	45	47	50	52
Volume de vides accessibles à l'eau (%)	28 jours	11,6	11,7	12	14,5	11,2	12,1	11,6	11,7
	56 jours	11,5	11,5	11,6	12	10,6	12	11,3	11,9

Essai d'écaillage

Quatre plaques ont été fabriquées pour chacune des conditions de mûrissement. Après le démoulage, les plaques ont été entreposées dans un environnement à 23°C et à une humidité relative de 50% jusqu'à l'âge de 28 jours. La surface a été brossée avant d'être recouverte d'une solution contenant 3% de NaCl pendant sept jours. À l'âge de 35 jours, les plaques ont été mises au congélateur où elles ont été soumises à 50 cycles de gel-dégel en présence de la solution saline. Des précautions ont été prises pour éviter l'évaporation de la solution saline. Le cycle de température est présenté à la figure 2.

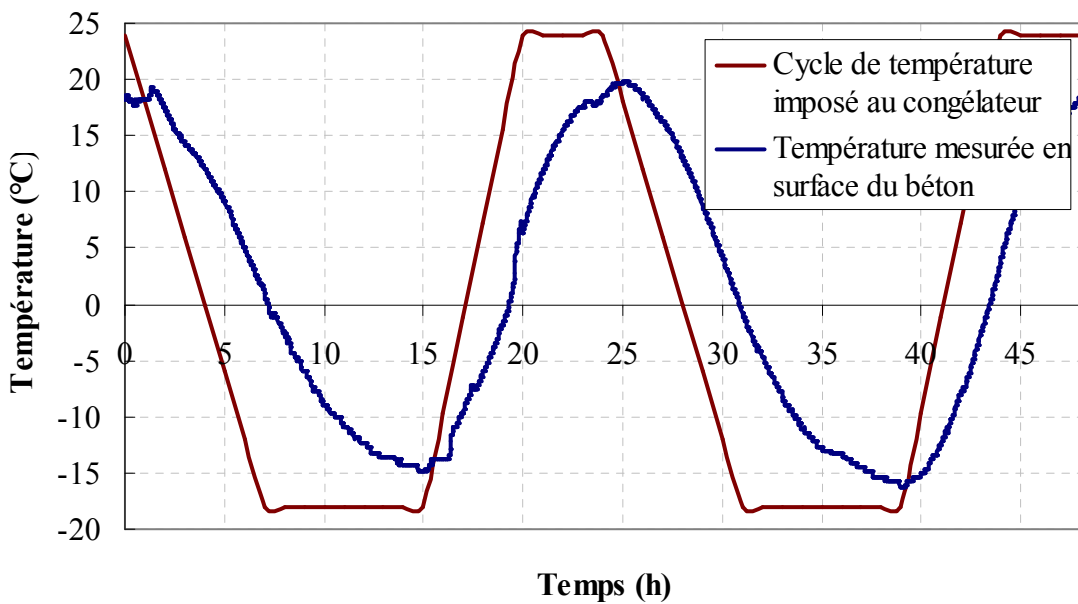


Figure 2: Cycle de température pour l'essai d'écaillage

Essai de sorptivité

L'essai de sorptivité consiste à mesurer le taux d'absorption d'une surface de béton en contact avec de l'eau. Le montage proposé par l'Université de Sherbrooke est illustré à la figure 3 [12-13]. L'eau contenue dans un réservoir déposé sur une balance est amenée dans une chambre hermétique fixée sur le dessus de l'échantillon. Un système d'acquisition branché sur la balance permet d'obtenir une mesure continue de la masse d'eau absorbée par la surface rapidement après le contact de l'eau et du béton. Le volume d'eau absorbé par unité de surface est porté en graphique en fonction de la racine carrée du temps. La pente de la droite ainsi obtenue est la sorptivité.

Les échantillons destinés à l'essai de sorptivité ont été fabriqués, mûris et entreposés dans les mêmes conditions que les plaques d'écaillage. À l'âge de 28 jours, les échantillons ont été placés à 100% d'humidité relative pour une période de sept jours avant d'être séchés à l'étuve à 35°C pendant deux semaines. Ils sont conservés dans des récipients contenant du gel de silice dans le but de maintenir leur teneur en eau constante jusqu'à la réalisation des essais.

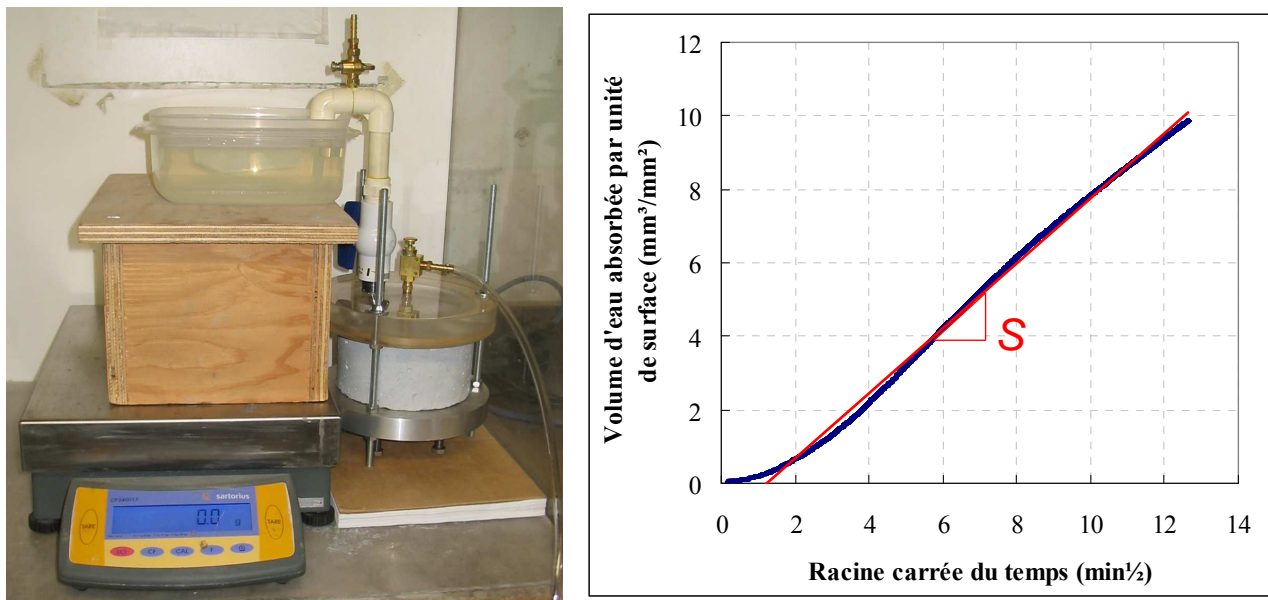


Figure 3: Essai de sorptivité développé par l'Université de Sherbrooke [12-13]

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Puisque le projet est en cours, seuls les résultats des essais d'écaillage seront abordés. Les graphiques présentés à la figure 4 illustrent le comportement général des différents mélanges soumis à l'essai d'écaillage. Chaque courbe est tracée à partir de la moyenne de quatre plaques. Certaines plaques ont toutefois subi des fuites et leur réparation a entraîné certaines dérogations à la stricte procédure de l'essai. Il faudra porter une attention particulière à l'interprétation des résultats car certaines plaques identiques ont parfois montré des comportements disparates. Une analyse plus approfondie des causes de ces variations sera effectuée avant de tirer les conclusions finales de cette étude. Ce sont les impressions générales qui se dégagent des résultats qui seront abordées dans le cadre de cet article.

Observations générales

Les observations générales permettent d'abord de confirmer que les dégradations par écaillage sont plus importantes lorsque la teneur en ajouts cimentaires augmente (fig. 4 c-d et f-g). Il est intéressant de noter que l'hypothèse de la couche de surface plus sensible à l'écaillage n'est pas systématiquement vérifiée par les résultats. Cette hypothèse découlait de l'observation d'un taux d'écaillage élevé lors des premiers cycles avant de passer à un régime moins destructif. On peut donc penser que cette couche plus faible ne serait pas clairement délimitée dans le cas de ces bétons ou alors qu'elle aurait une épaisseur supérieure à celle affectée par les 50 premiers cycles.

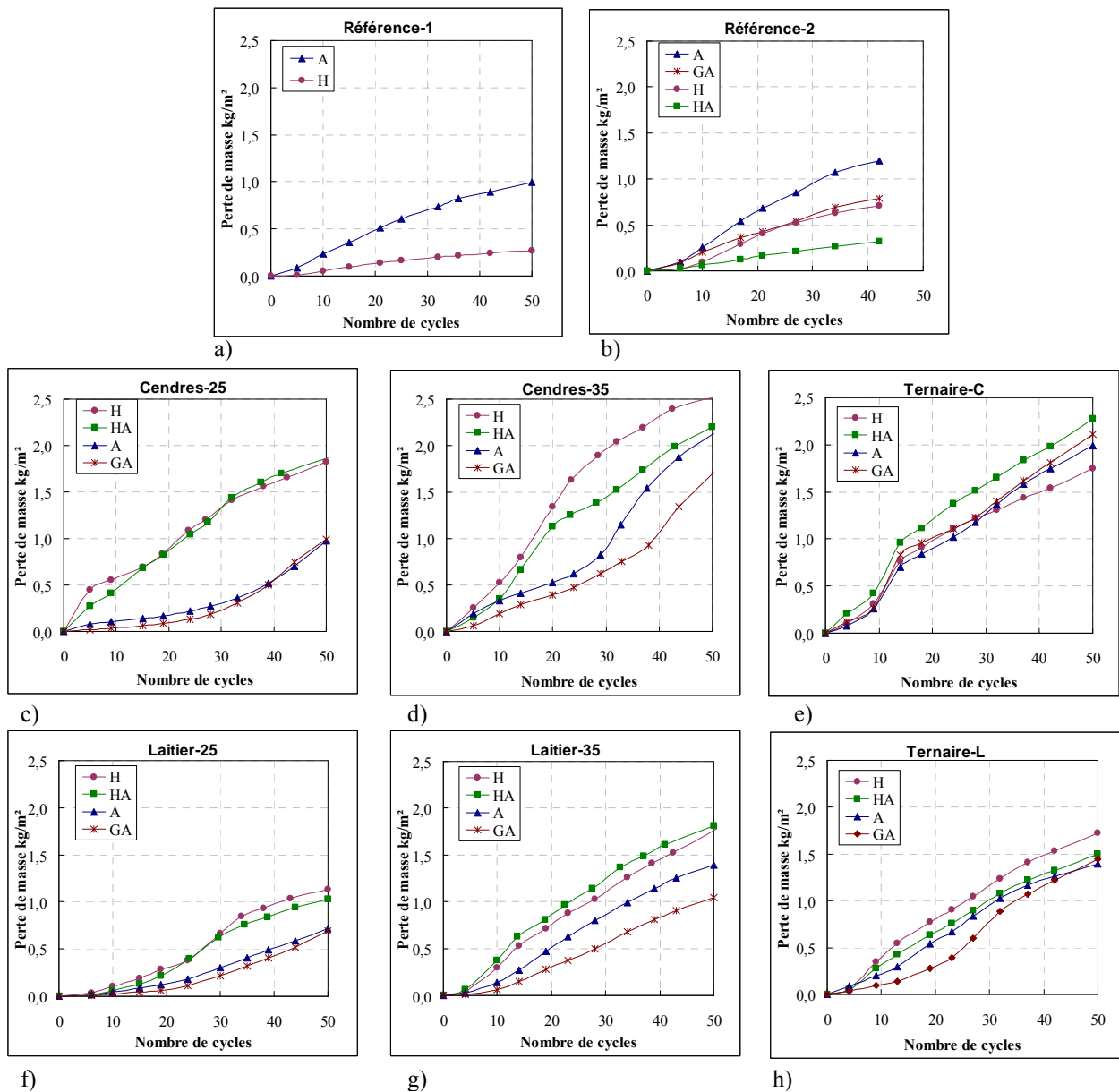


Figure 4: Perte de masse par écaillage en fonction du nombre de cycles pour les huit mélanges

Influence du mûrissement

Les résultats confirment que l'application d'un agent de cure liquide immédiatement après le ressuage améliore la résistance à l'écaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires (fig. 4 c-d-e-f-g-h) alors que pour le béton de référence, l'effet contraire est observé (fig. 4 a-b). Il est intéressant de noter que selon la composition du mélange, les bétons ne réagissent pas de la même façon à la méthode de cure. Pour les mélanges contenant 25% d'ajouts cimentaires (fig. 4 c-f), l'application d'un agent de cure immédiatement après le ressuage améliore considérablement la résistance à l'écaillage comparativement à l'utilisation d'une toile de jute humide. Lorsqu'un taux de 35% d'ajouts est atteint (fig. 4 d-g), le ressuage joue un rôle plus important puisque l'utilisation de la membrane géotextile à la base du moule permet de réduire l'écaillage. L'augmentation de la teneur en ajouts cimentaires semble augmenter la sensibilité de la surface aux conditions de cure puisque pour les taux de remplacement de 35%, l'écart entre les courbes est plus important. Dans le cas des bétons fabriqués avec les ciments ternaires (fig. 4 e-h), l'effet de la cure est beaucoup moins marqué. La présence de fumée de silice dans les mélanges semble réduire l'effet bénéfique de l'agent de cure (fig. 4 a-b-e-h).

Variabilité des résultats

Une variabilité relativement importante des résultats a été notée. La figure 5 témoigne de deux exemples frappant de ce phénomène. Bien que les deux mélanges de référence soient identiques, la perte de masse par écaillage du mélange Référence-2 est plus élevée (fig. 5a). L'influence de certaines différences mineures dans la procédure de fabrication du mélange pourrait être étudiée. Toutefois, la dispersion des résultats peut également être observée entre les plaques d'un même mélange ayant subi la même cure. Pour le mélange Laitier-35, d'après les moyennes des quatre plaques, la méthode A apparaît clairement plus résistante à l'écaillage que la méthode H (fig. 4f). Toutefois, les quatre plaques H se comportent de façon très différente et la moitié d'entre elles se confondent avec la moyenne des plaques A (fig. 5b).

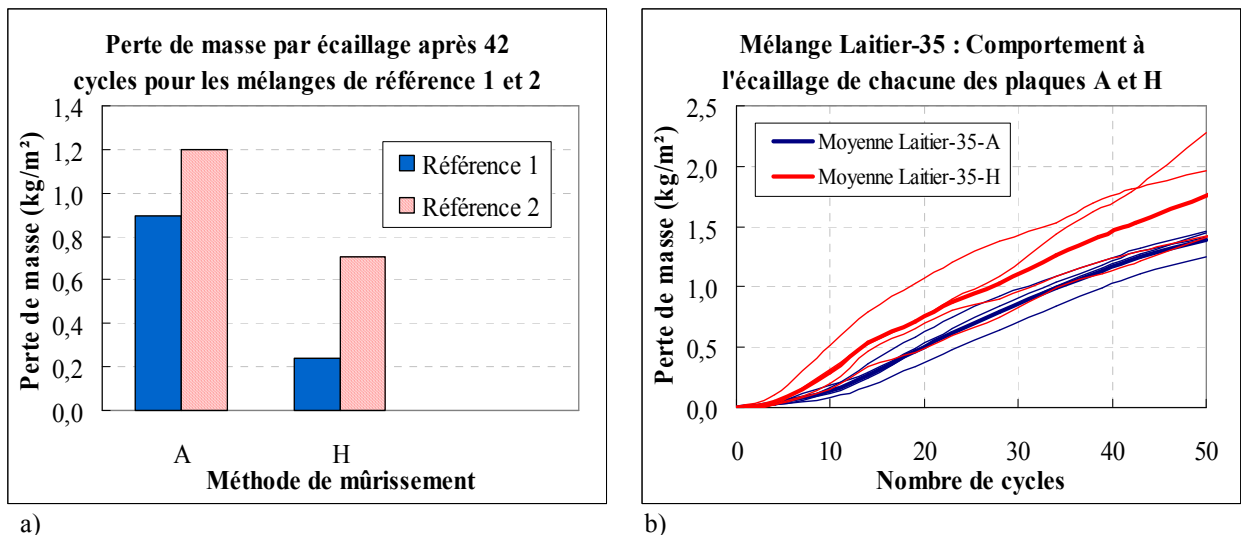


Figure 5: Exemples de la variabilité des résultats

De telles observations poussent à questionner la pertinence de l'utilisation des moyennes en tant qu'outil de comparaison. Il sera inévitable de tenir compte du comportement individuel des plaques lors de l'interprétation des résultats.

CONCLUSIONS

Les conclusions finales de cette étude seront disponibles en 2006. À ce jour, les résultats préliminaires permettent d'énoncer quelques conclusions :

- L'augmentation de la teneur en ajouts cimentaires semble réduire la résistance à l'écaillage du béton telle qu'évaluée en laboratoire
- L'effet de la méthode de mûrissement sur la résistance à l'écaillage semble varier selon la composition du mélange
- L'application d'un agent de cure après la disparition de l'eau de ressuage en surface semble avoir un effet bénéfique sur la résistance à l'écaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires alors que l'effet contraire est observé dans le cas des bétons de référence

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les partenaires qui ont permis la réalisation de ce projet (Université Laval, Université de Toronto, Université de Sherbrooke, Association Canadienne du Ciment, Lafarge Canada Inc., St. Marys Cement Company, Ciment St-Laurent, Ontario Power Generation Inc. Pozzolanic International Ltd, American Concrete Institute). Des remerciements spéciaux sont adressés à l'ACI, section du Québec et de l'est de l'Ontario pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de ces travaux par l'octroi une bourse d'étude à l'automne 2004.

RÉFÉRENCES

- [1] MACHABÉE Y. (1998) *Étude de l'influence de certains paramètres sur la résistance à l'écaillage des bétons*, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 211 p.
- [2] MARCHAND J., JOLIN M., MACHABÉE Y. (2005) *Deicer salt-scaling resistance of supplementary cementing material concrete: Laboratory results against field performance*, (under press).
- [3] THOMAS M.D.A. (1997), *Laboratory and field studies of salt scaling in fly ash concrete*, Frost resistance of concrete, Édité par M.J. Setzer et R. Auberg, E & FN SPON, London, U.K., p. 21-30
- [4] LAROCHE M.C., MARCHAND J., PIGEON M. (1997) *Reliability of the ASTM C 672 test procedure, Freeze-thaw durability of concrete*, Édité par J. Marchand, M. Pigeon et M.J. Setzer, E & FN SPON, London, U.K., p. 199-209
- [5] MARCHAND J. ET PIGEON M. (1996) *Résistance du béton à l'écaillage dû au gel en présence de sels fondants – une revue des récents développements dans le domaine*, CRIB, Université Laval, Québec, Canada, 30 p.
- [6] BILODEAU A., BOUZOUBAA N., FOURNIER B. (2004) *R & D Consortium on de-icing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials, Case study report*, CANMET, 80 p.
- [7] MARCHAND J., SELLEVOLD E.J., PIGEON M., (1994) *The deicer salt scaling deterioration of concrete – An overview*, ACI-SP-145, p.1-46
- [8] TALBOT C. (1996) *La résistance à l'écaillage des bétons contenant des ajouts minéraux*, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 236 p.
- [9] DEROSIERS H. (1999) *Influence des cendres volantes sur le comportement au gel des matériaux cimentaires*, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 223 p.
- [10] BILODEAU A., MALHOTRA V.M. (1997) *Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: CANMET research*, Freeze-thaw durability of concrete, Édité par J. Marchand, M. Pigeon et M.J. Setzer, E & FN SPON, London, U.K., p. 121-156
- [11] HOOTON R.D., BOYD A., (1997), *Effects of finishing, forming and curing on de-icer salt scaling resistance of concretes*, Frost resistance of concrete, Édité par M.J. Setzer et R. Auberg, E & FN SPON, London, U.K., p. 174-183
- [12] BÉGUÉ P. & GAGNÉ R. (2004) *Relation écaillage/sorptivité des bétons confectionnés à l'aide de ciments aux ajouts: Étude préliminaire*, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 13 p.
- [13] BÉGUÉ P., GAGNÉ R. ET MARQUIS A. (2004) *Effects of covercrete quality on the sorption behaviour of concrete*, CRIB, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 21 p.