



**La Direction des infrastructures,
un partenaire incontournable**



Utilisation de la poudre de verre dans les bétons de trottoir à Montréal





R. Morin, ing. M.Sc.A.
Ville de Montréal

A. Tagnit Hamou, ing. Ph.D.

A. Omran ing. Ph.D.

A. Zidol Ph.D.

CRIB Département de Génie Civil

Université de Sherbrooke

Contenu



- Introduction
- Projets réalisés à la Ville
 - Réalisation + Essais/résultats + Suivis
 - 2011 Musée des Beaux Arts de Montréal
 - 2013 Rue Poutrincourt
 - 2014 Boul. Gouin, 16^{ième} avenue, rue Chénier, square Cabot
 - 2015 Rue Cedar
- Projets prévus en 2016
- Conclusions

Introduction

- Chaire; débute en 2004 et financée par la SAQ
- Ville de Montréal; membre de la chaire en novembre 2012



Objectifs de la Ville de Montréal

- Étudier le comportement du béton de trottoir fabriqué avec différents % de poudre de verre (PV)
- Valider les aspects de durabilité au gel-dégel et la résistance à l'écaillage des bétons avec PV pour les trottoirs
- Essais sur bétons avec PV sous différentes expositions
($T_c = 5, 23, 35^{\circ}\text{C}$)
- Développer un nouveau mélange incorporant la PV pour trottoir comme alternative à ceux stipulés au devis 3VM-10 de la ville

Les recherches

PI : Arezki TAGNIT-HAMOU

Professeurs collaborateurs

Richard Gagné
Ammar Yahia
Ben Mourad Amor
Martin Cyr
Nathalie Roy

Professionnels et Post-docs:

David Harbec
Ahmed Omran
Tohoue M. Tognonvi
Jeff Sharman
Balint Simon
Ablam Zidol
Said Laldji
Abdelkrim Bengougam
Osama Ebead

Étudiants PhD:

Ailing Xie
Nancy Soliman
Aliques Granero Josep
Mohammed Mousa
William Wilson
Isabelle Fily-Paré

Salama Fattahi
Maryna Danilova
Huda Saeed,
Rachida Idir
Ablam Zidol

Étudiants MSc:

Étienne Dumas-Morin
Aly Hussein Abdalla
Arame Niang
Ana Balaguer Pascual
Mari-Jo S. Bastien
Hanane Bahri
Sihem Chekireb
Jean Philippe .Faubert
Isabelle Fily-Paré
Faisal,
Lamine Kateb

Stagiaires:

Rene-Pierre Lafleur
Frédéric Kassab
Jules Morin

Exigences de la norme canadienne CSA A 23.1

A23.1-14

© 2015 Groupe CSA

Tableau 1

Définitions des classes d'exposition C, F, N, A, S et R

(voir les chapitre 3 et les articles 4.1.1.1.1, 4.1.1.1.3, 4.1.1.5, 4.1.1.8.1, 4.1.2.3, 4.4.4.1.1.1, 4.4.4.1.1.2, 6.1.4, 6.6.7.5.1, 8.12.1, 9.1, L.3 et R.1, les tableaux 2, 3 et 17 et l'annexe L)

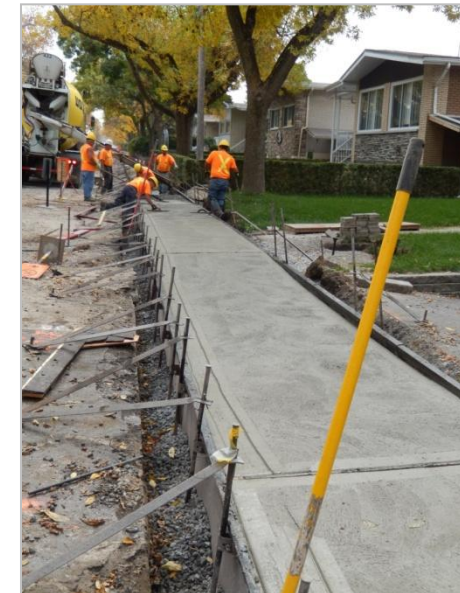
C-XL	Béton armé exposé aux chlorures ou à d'autres environnements agressifs, soumis ou non au gel-dégel, pour lequel les attentes en matière de durabilité sont plus élevées que celles des classes C-1.
C-1	Béton armé exposé aux chlorures, soumis ou non au gel-dégel. Exemples : tabliers de ponts, planchers et rampes d'ouvrages de stationnement, parties d'ouvrages maritimes situées à l'intérieur des zones de marnage et d'éclaboussement, ouvrages en béton exposés aux éclaboussements d'eau de mer et piscines d'eau salée. Pour les expositions à l'eau salée et aux embruns d'eau salée, les exigences relatives à une exposition S-3 doivent également être respectées.
C-2	Béton non armé exposé aux chlorures et soumis au gel-dégel. Exemples : planchers de garage, porches, marches, chaussées, trottoirs, bordures et caniveaux.

Tableau 2

Exigences relatives aux classes d'exposition C, F, N, A et S

(voir les articles 4.1.1.1.1, 4.1.1.1.3, 4.1.1.3, 4.1.1.4, 4.1.1.5, 4.1.1.6.2, 4.1.1.8.1, 4.1.1.10.1, 4.1.2.1, 4.3.1, 4.3.5.2.2, 4.3.7.2, 4.3.7.3, 7.4.1.1, 8.7.5.1, 8.12.1, 9.4, 9.5, L.1, L.3 et R.3 et le tableau 1)

Classe d'exposition*	Rapport eau/liant maximal†	Résistance minimale spécifiée à la compression (MPa) et âge j) au moment de l'essai‡***	Catégorie de teneur en air selon le tableau 4	Type de cure (voir le tableau 19)			Exigences relatives à l'essai de perméabilité aux ions chlorure et âge au moment de l'essai‡
				Béton ordinaire	BFDAC 1	BFDAC 2	
C-XL ou A-XL	0,40	50 à 56 j	1 ou 2§	3	3	3	< 1000 coulombs dans l'espace de 91 j
C-1 ou A-1	0,40	35 à 56 j	1 ou 2§	2	3	2	< 1500 coulombs dans l'espace de 91 j
C-2 ou A-2	0,45§§	32 à 28 j	1	2	2	2	—

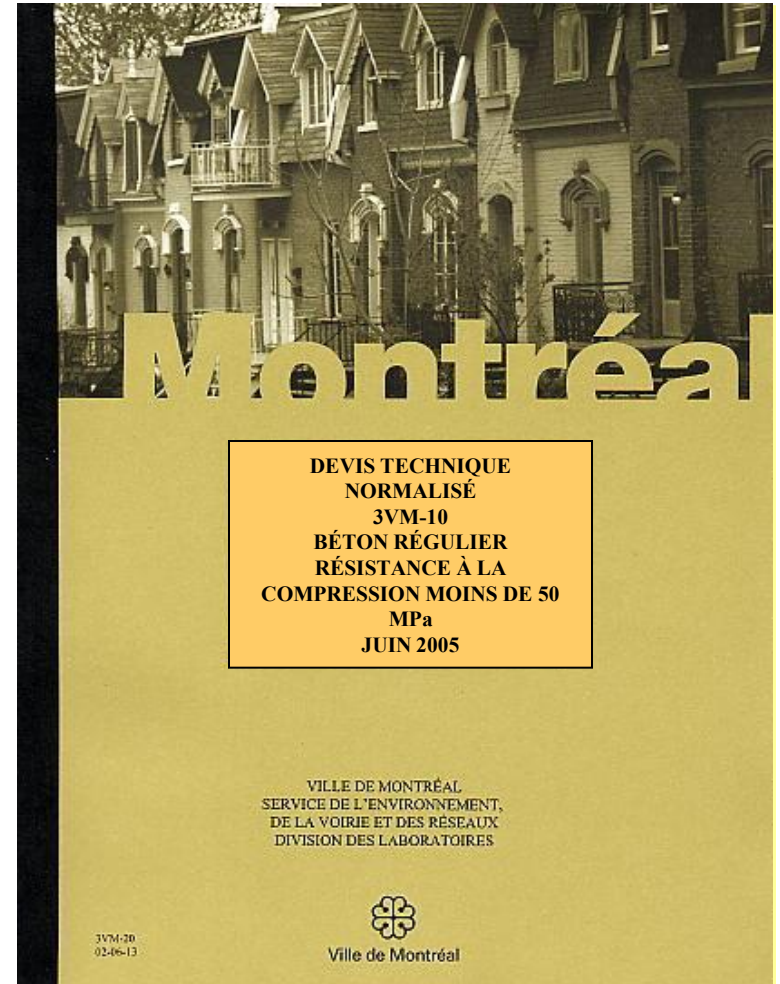


**Béton de trottoir =
Classe d'exposition C-2**

Devis 3VM-10

➤ 4.2 Liant

- Pour le béton de trottoir ou de bordure, utiliser un liant consistant en 70 à 80 % de ciment portland type GU et en 20 à 30 % de ciment hydraulique composé. Le ciment composé sera de type GUb-SF, ou de type GUb-F/SF ou GUb-S/SF.



Projets réalisés par la Ville de Montréal

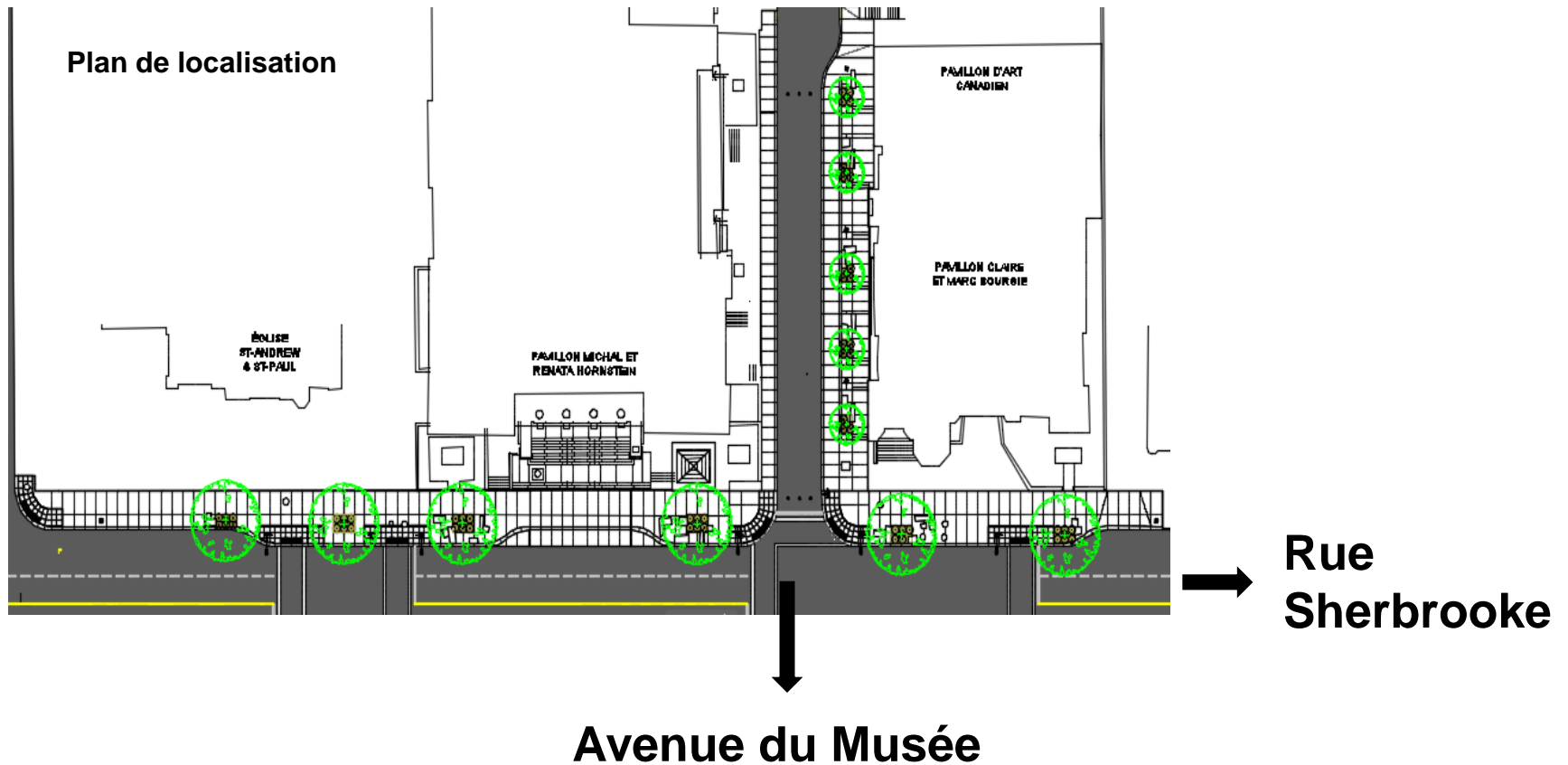
Date	Projets	Fournisseurs de Béton	PV%
2011-Octobre	Musée des beaux-arts	Lafarge	10%
2013-Octobre	Rue Poutrincourt	Unibéton	10, 20, 25%
2014-Août	Rue Gouin E	Demix Béton	10, 20%
2014-Août	16ème Avenue	Unibéton	10, 20%
2014-Septembre	Ave. Chénier	Lafarge	10, 20%
2014-2015	Square Cabot	Lafarge	15%
2015-Septembre	Rue Cedar	Unibéton	10%

Contenu



- Introduction
- **Projets réalisés à la Ville**
 - Réalisation + Essais/résultats + Suivis
 - 2011 Musée des Beaux Arts de Montréal
 - 2013 Rue Poutrincourt
 - 2014 Boul. Gouin, 16^{ième} avenue, rue Chénier, square Cabot
 - 2015 Rue Cedar
- Projets prévus en 2016
- Conclusions

2011 - Projet MBAM (Musée des Beaux Arts de Montréal)



2011 - Projet MBAM

➤ Objectifs

- Béton architectural ayant une couleur plus pâle
- Béton plus « écologique »
- Utilisation de la PV à 10% du contenu cimentaire



2011 - Projet MBAM



Contenu

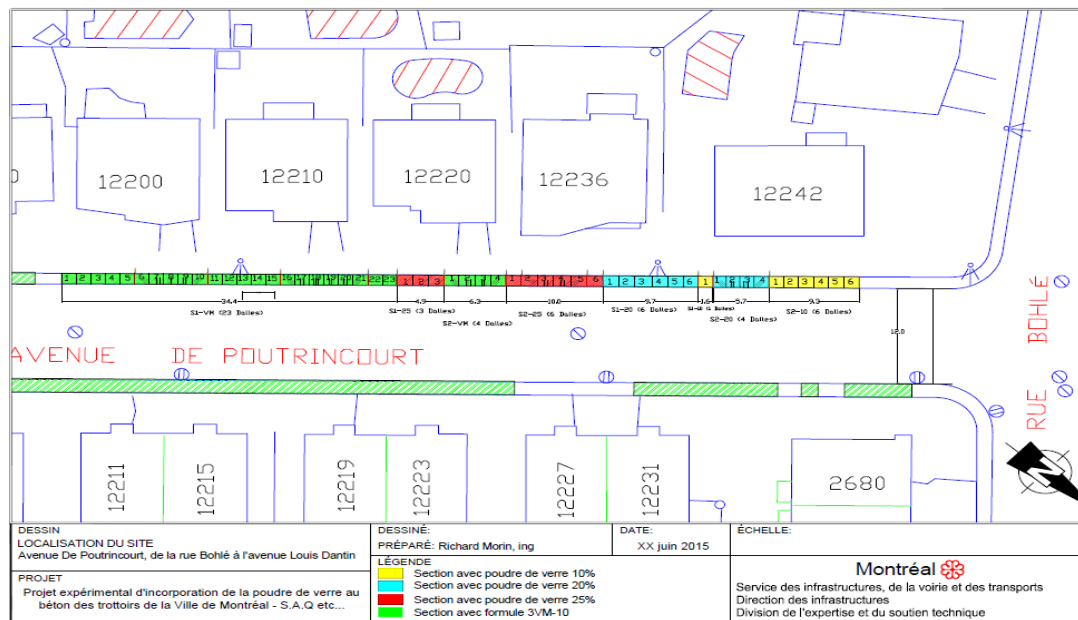


- Introduction
- **Projets réalisés à la Ville**
 - Réalisation + Essais/résultats + Suivis
 - 2011 Musée des Beaux Arts de Montréal
 - 2013 Rue Poutrincourt
 - 2014 Boul. Gouin, 16^{ième} avenue, rue Chénier, square Cabot
 - 2015 Rue Cedar
- Projets prévus en 2016
- Conclusions

2013 - Projet rue Poutrincourt

➤ Arrondissement Ahuntsic-Cartierville

- **3 sections** de trottoir; béton avec 10 %, 20 % et 25% de PV,
- **1 section** de trottoir ; béton témoin devis 3VM-10
- Essais réalisés sur des bétons conditionnés
 - Temps froid = 5 °C
 - Température normalisée = 23 °C
 - Temps chaud = 35 °C
 - Conditions ambiantes extérieures –dalles témoins



Composition des mélanges

Composition des mélanges pour 1 m³ de béton
Avec autorisation de Unibéton



	Quantité			
	Témoin	10% PV	20% PV	25% PV
E/L	0,43	0,41	0,41	0,40
Dosage total en liant, kg/m ³	370	390	400	420
Ciment GU (densité = 3,15), kg/m ³	270 (73%)	350	320	315
Ciment GUb-SF (densité = 3,10), kg/m ³	100 (27%)	--	--	--
Poudre de verre (densité = 2,54), kg/m ³	--	40	80	105
Eau, kg/m ³	160	160	165	168

Essais normalisés sur bétons

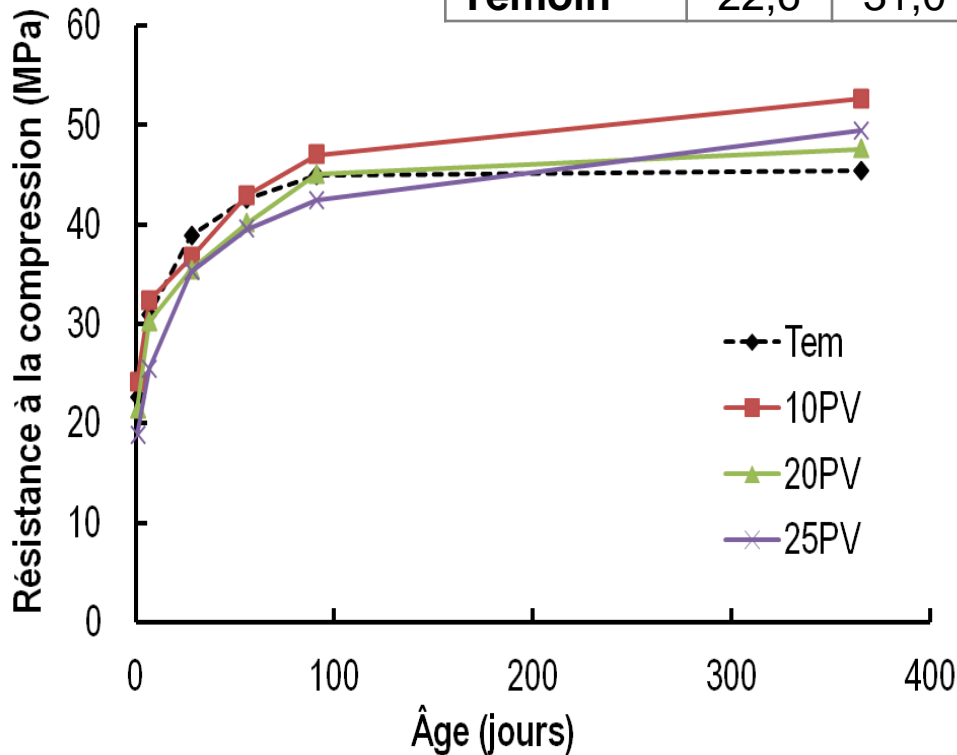


Transportés à UdeS après 24h
de cure à la Ville de Montréal

Résistance à la compression (MPa)

ASTM C39

Âge →	1 j	7 j	28 j	56 j	91 j	1 an
10% PV	24,2	32,4	36,7	42,9	47,0	52,6
20 % PV	21,4	30,2	35,4	40,1	45,0	47,6
25 % PV	18,9	25,5	35,3	39,5	42,4	49,4
Témoin	22,6	31,0	38,9	42,6	44,9	45,4



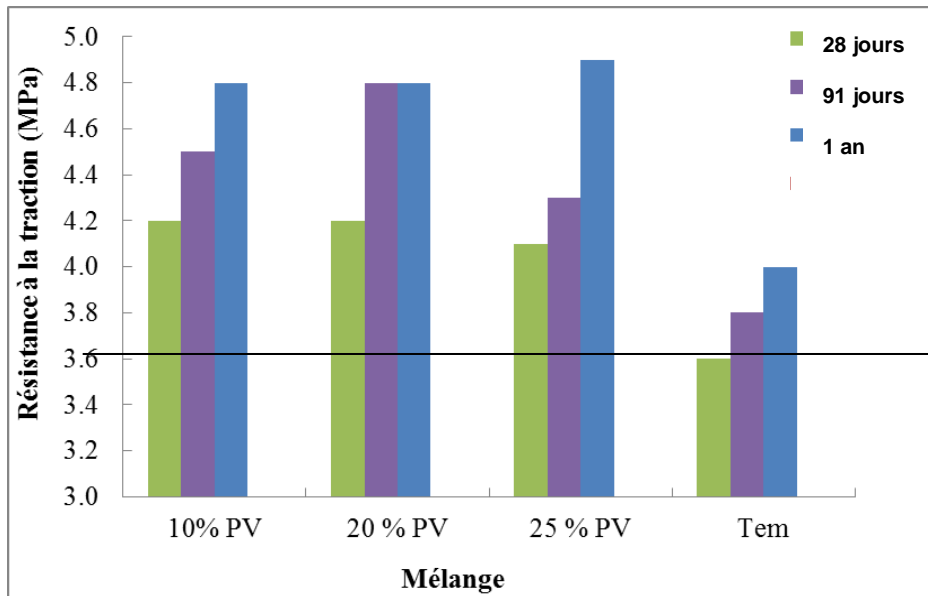
• Résistances

- conformes
- 28 jours; légèrement + faible
- Accroissement dans le temps
- 1 an; légèrement + élevée

Résistance à la Traction (MPa)

ASTM C 496

Âge →	28 j	91 j	1 an
10% PV	4.2	4.5	4.8
20 % PV	4.2	4.8	4.8
25 % PV	4.1	4.3	4.9
Témoin	3.6	3.8	4.0



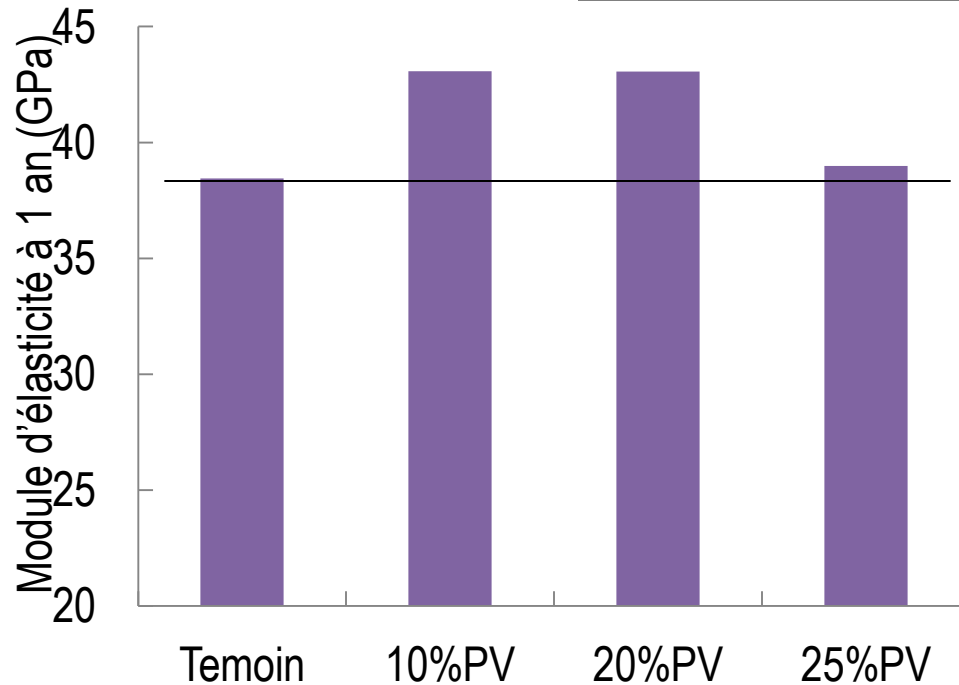
•Résistances

- 28 jours; légèrement + élevées
- Accroissement dans le temps

Module d'élasticité (GPa)

ASTM C 469

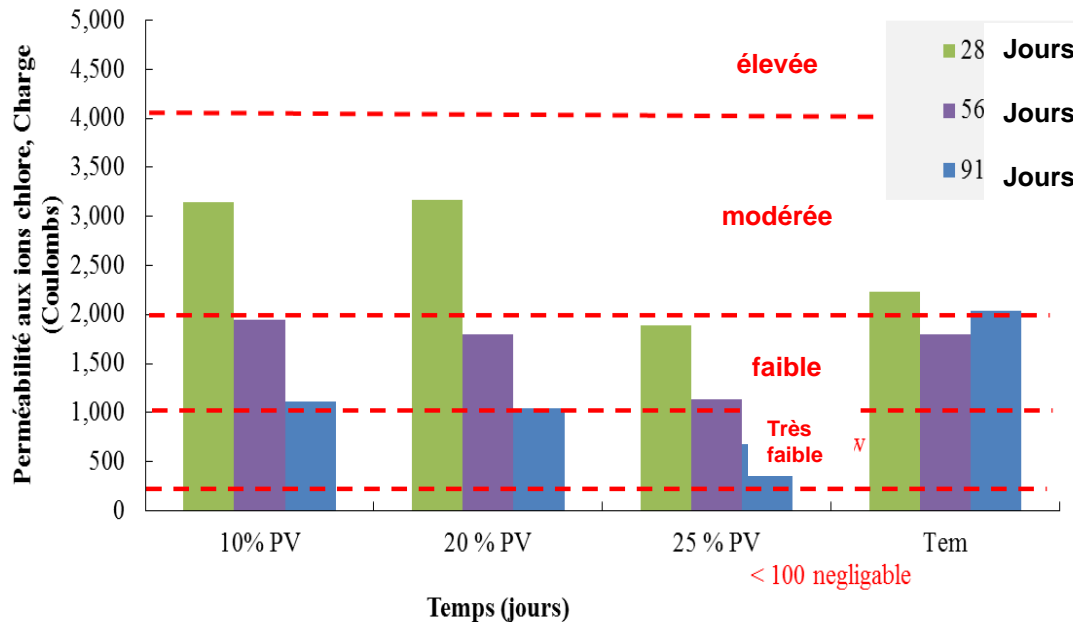
Module d'élasticité à 1 an (GPa)				
	Témoin	10%PV	20%PV	25%PV
1	38.3	42.8	43.0	40.7
2	38.6	43.4	43.1	37.3
moyenne	38.4	43.1	43.1	39.0



Perméabilité aux ions chlore

ASTM C 1202

Perméabilité aux ions chlore (Coulombs)			
Âge →	28 j	56 j	91 j
10% PV	3144	1950	1116
20 % PV	3171	1802	1044
25 % PV	1891	1135	674
Témoin	2229	1803	2037

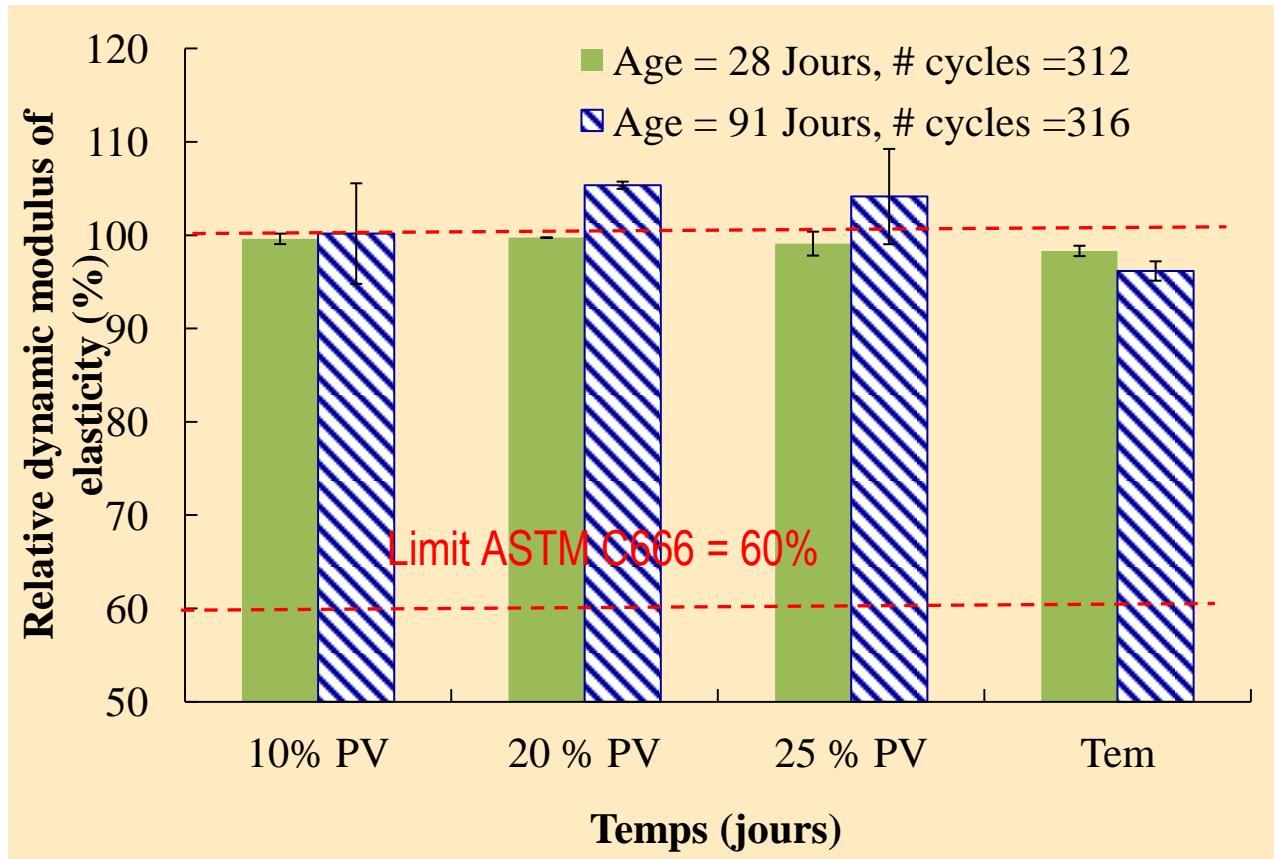


•Perméabilités

- 91 jours; + imperméable
- Décroissent dans le temps
- Conformes à un béton de classe d'exposition C-1

Résistance aux cycles de gel dégel

ASTM C666



Essais sur bétons conditionnés

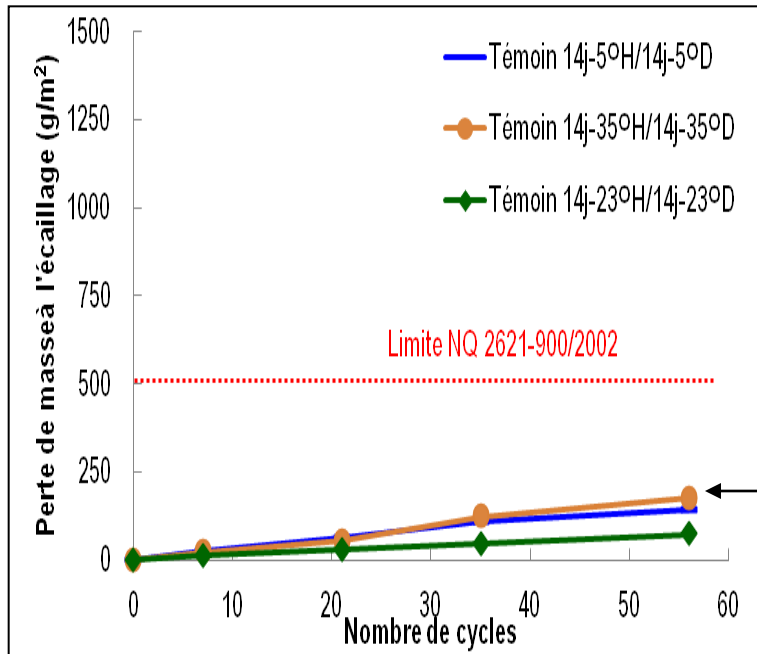
- 5 °C; temps froid
- 23 °C température normalisée
- 35 °C; temps chaud



**Éprouvettes réalisées
lors du chantier**

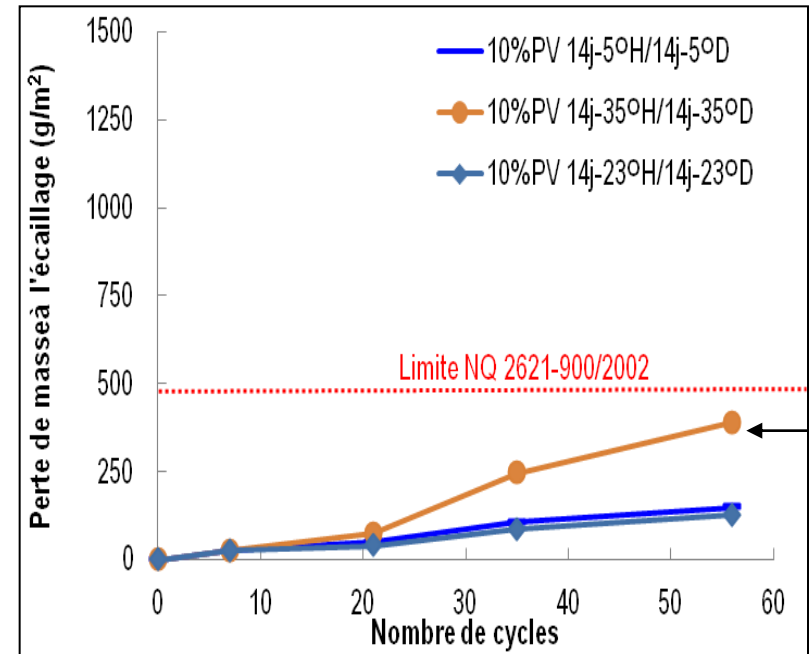
Résistance à l'écaillage

BNQ 2621-900



Béton témoin

- conforme
- températures de conditionnement
 - Perte + élevée à 35 °C

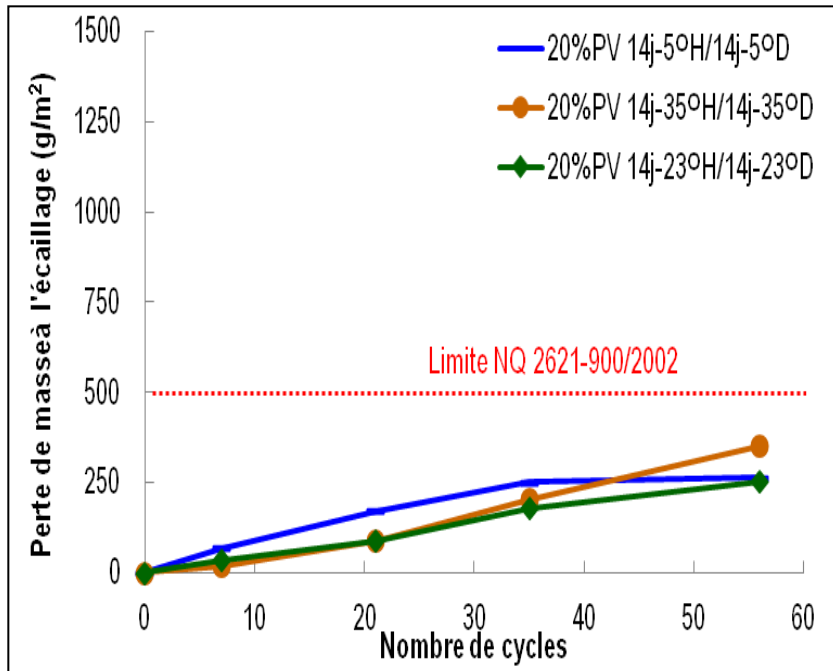


Béton 10% PV

- conforme
- températures de conditionnement
 - Perte + élevée à 35 °C
 - + grande sensibilité que le béton témoin

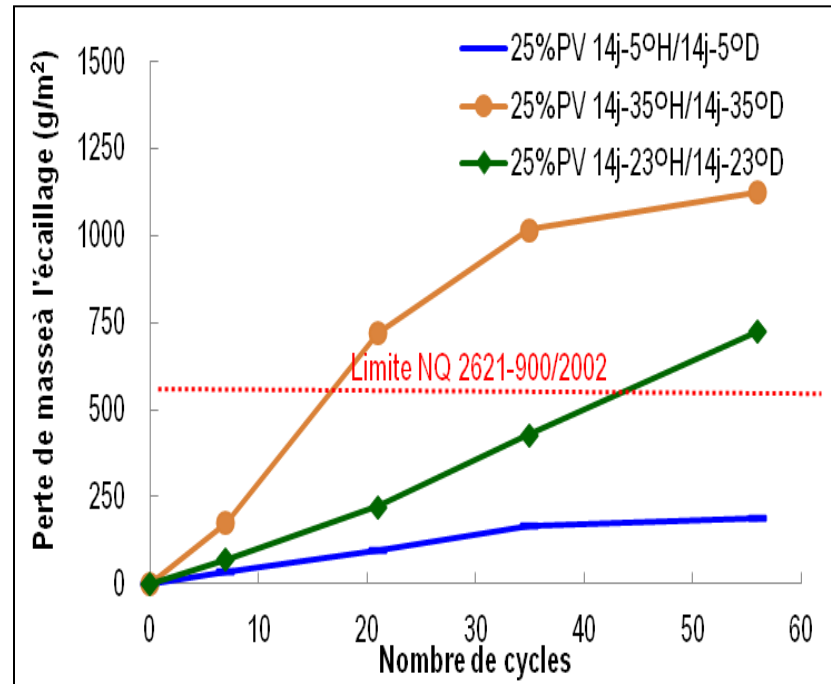
Résistance à l'écaillage

BNQ 2621-900



Béton 20% PV

- conforme
- température de conditionnement
 - Perte + élevée à 35 °C



Béton 25% PV

- Non-conforme
- température de conditionnement
 - + grande sensibilité que le béton témoin

Essais sur bétons en conditions de terrain

➤ Bétonnage 2 oct 2013

↓
Éprouvettes prélevées
dans les dalles témoins



Application de
sel de
déverglaçage

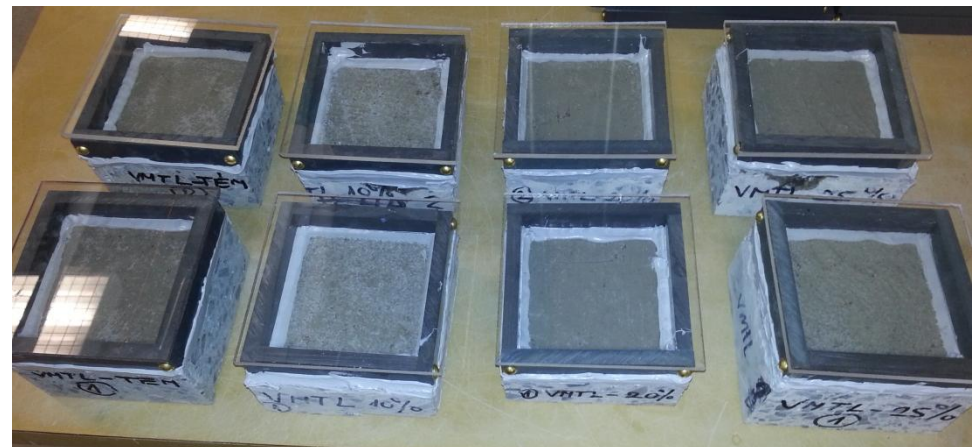
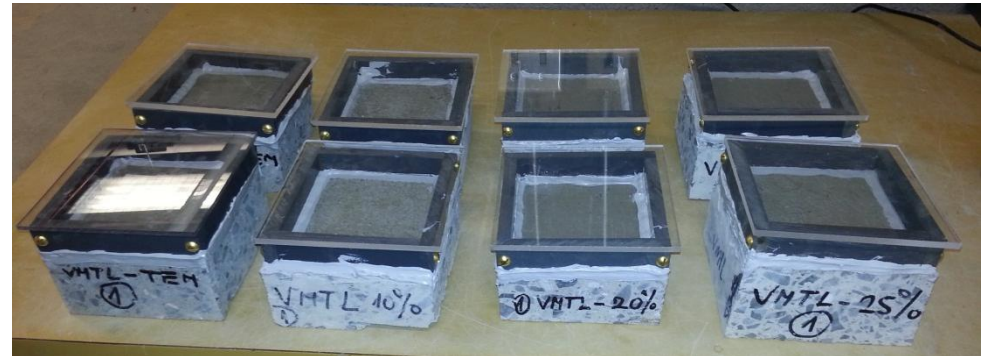


Résistance à l'écaillage

BNQ 2621-900 modifié

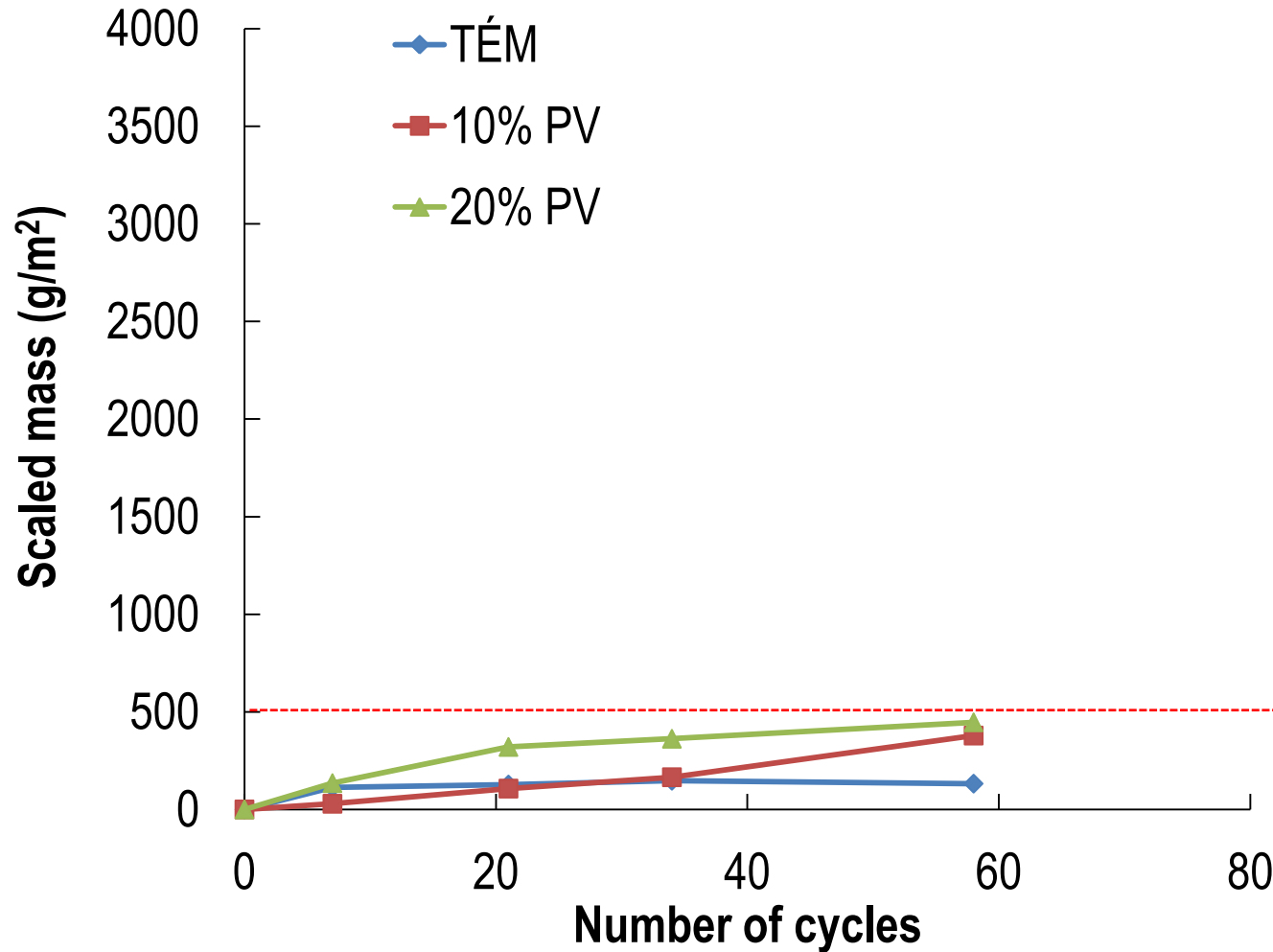


Préparation de 2 plaques d'écaillage
pour chaque mélange



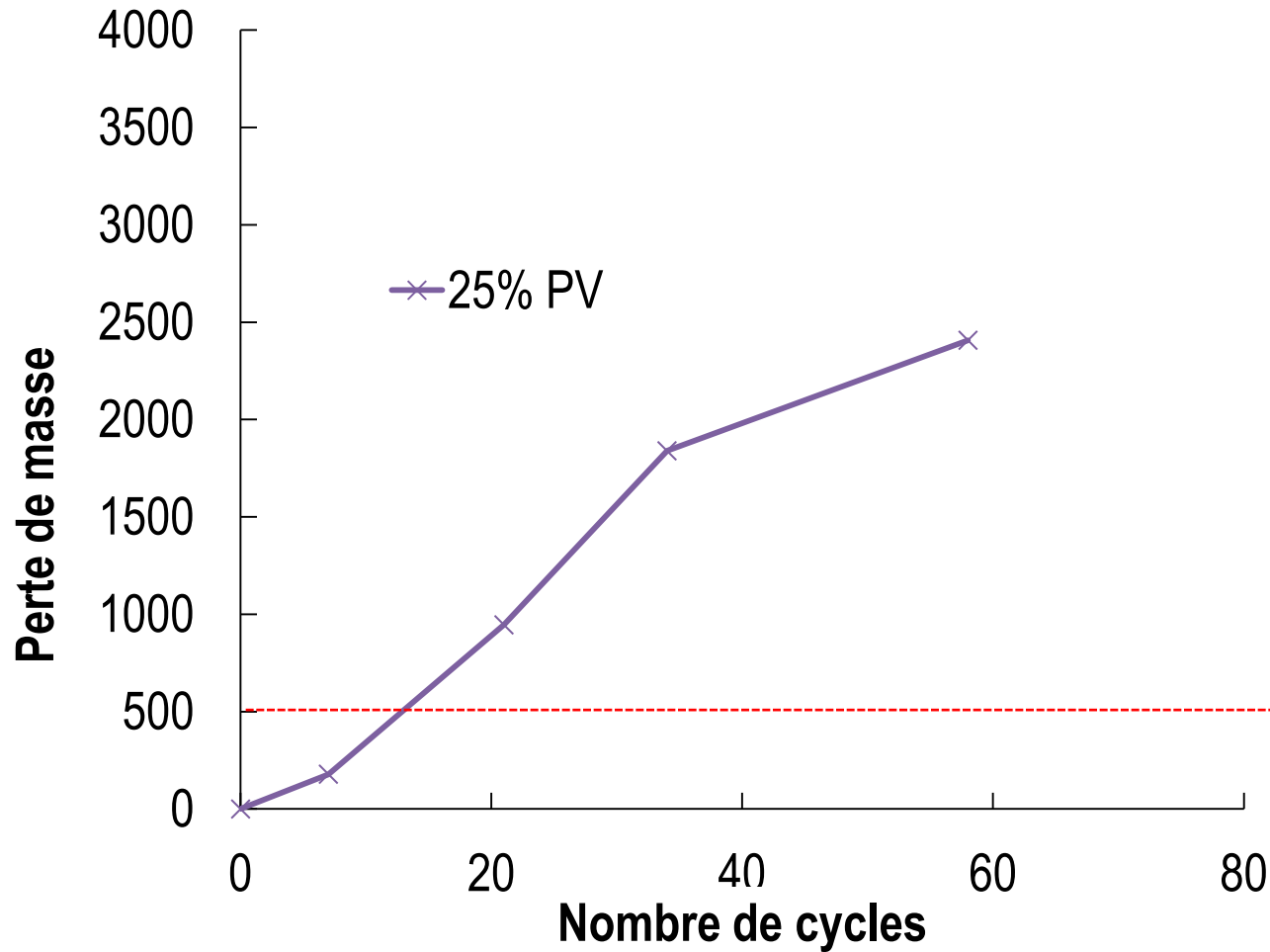
Résistance à l'écaillage

BNQ 2621-900 modifié



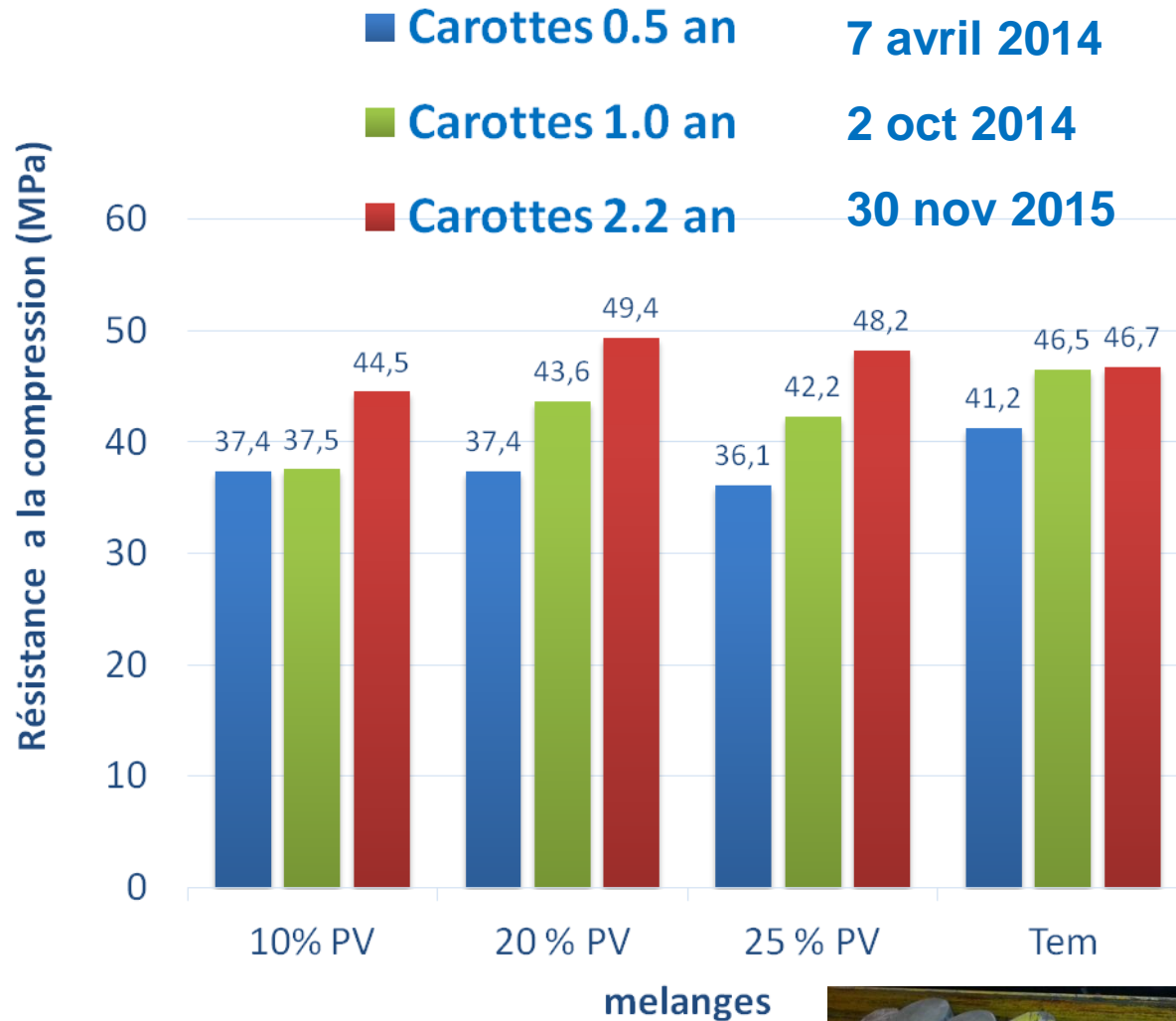
Résistance à l'écaillage

BNQ 2621-900 modifié



Résistance à la compression (MPa)

ASTM C39



2013 - Projet rue Poutrincourt

➤ Fiche d'inspection

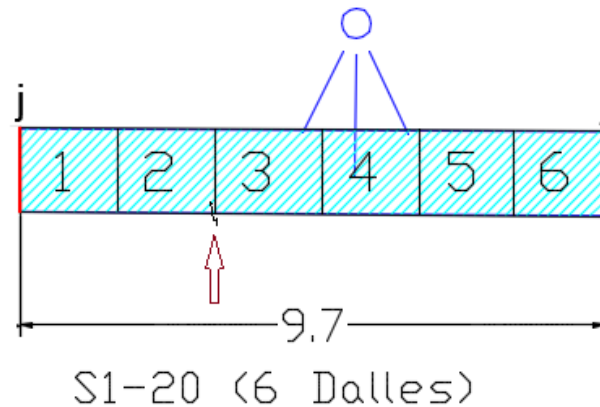
Inspection d'Août 2015

CARACTÉRISATION DE LA SURFACE DES TROTTOIRS

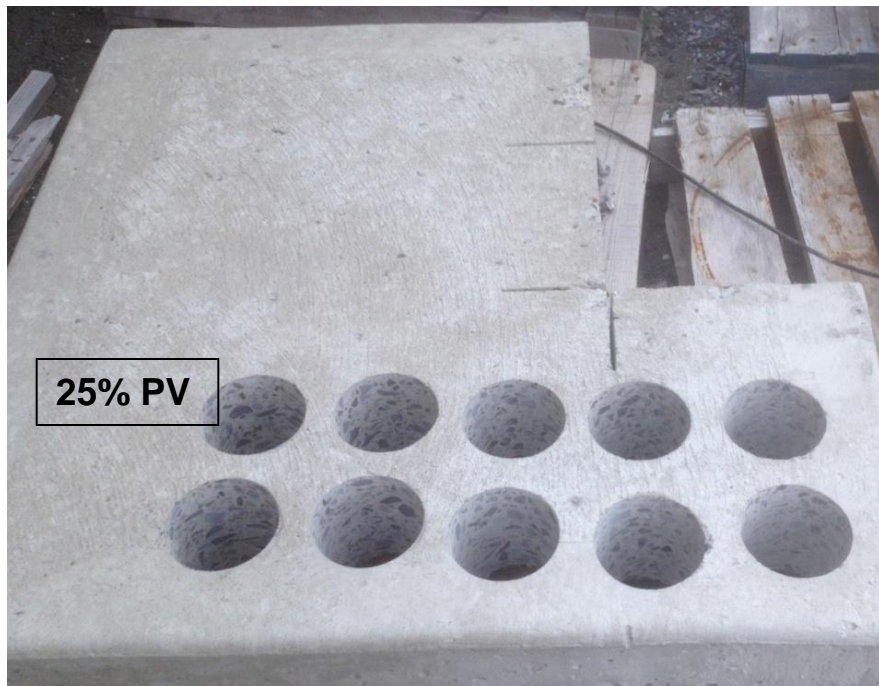
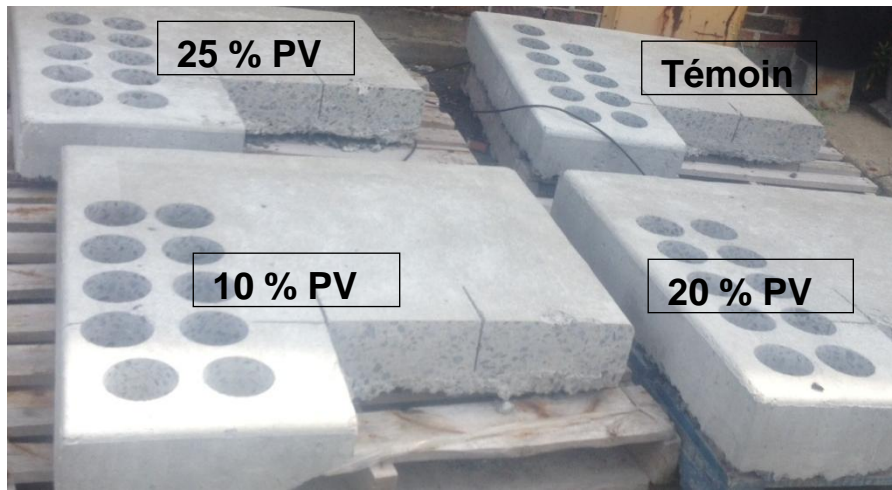
Dalle: S1-20-(2&3)

	Écaillage	Cône d'éclatement	Fissuration	Dommages mécaniques (déneigement)	
		Pop-Out		Épaufrure	Écornure
Faible			oui		
Moyenne					
Majeure					

Remarque: Une fissure à la fin du joint décoratif entre la dalle 2 et la dalle 3 (côté rue)



2013 - Projet rue Poutrincourt



Contenu



- Introduction
- **Projets réalisés à la Ville**
 - Réalisation + Essais/résultats + Suivis
 - 2011 Musée des Beaux Arts de Montréal
 - 2013 Rue Poutrincourt
 - 2014 Boul. Gouin, 16^{ième} avenue, rue Chénier, square Cabot
 - 2015 Rue Cedar
- Projets prévus en 2016
- Conclusions

Essais normalisés sur bétons

Béton à l'état frais

	Essais	Normes
1	Affaissement (sur chantier et après ajout de superplastifiant)	CSA A23.2-5C
2	Teneur en air	CSA A23.2-4C
3	Masse volumique	CSA A23.2-6C
4	Température du béton et ambiante	CSA A23.2-17C
5	Temps de prise	ASTM C403

Essais normalisés sur bétons

Béton à l'état durci

	Essais	Normes	Échéances
1	Résistance en compression	CSA A23.2-9C	1-3-7-28-56-91 jours - 1 an & 3 ans
2	Résistance en traction	CSA-A23.2-13C-09	28-91 jours 1 an & 3ans
3	Résistance en flexion	CSA-A23.2-8C-09	28-91 jours 1 an & 3ans
4	Résistance au gel dégel	ASTM C666	28 & 91 jours
5	Résistance à l'écaillage	BNQ 2621-900	28 & 91 jours
6	Perméabilité aux ions chlore	ASTM C1202	28 - 56 & 91 jours
7	Résistance à l'abrasion	ASTM C779	28 - 56 & 91 jours
8	Retrait de séchage	ASTM C157	28 - 56 & 91 jours
9	Réaction Alcalis Granulats (RAG)	ASTM C1293	1 jour, et 1, 4, 8, 13, 18, 26, 39, 52, 65, 78, 91, 104 semaines

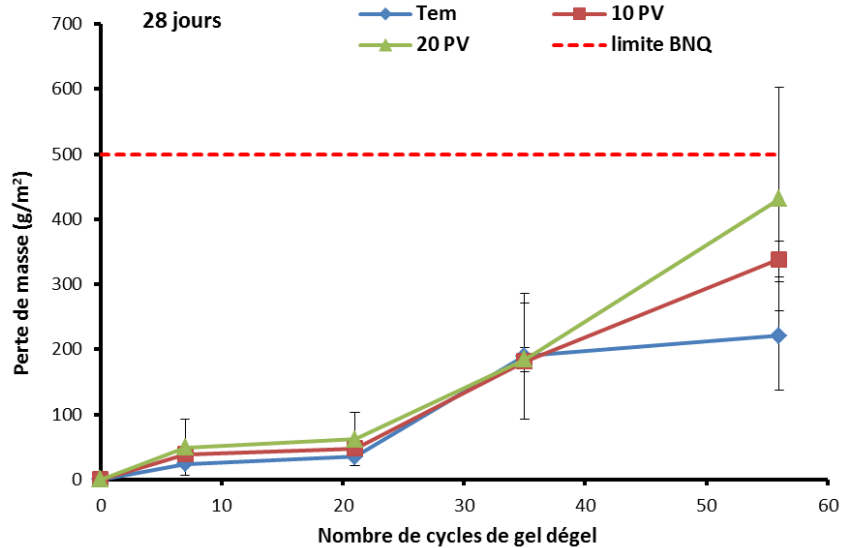
Essais sur les éprouvettes prélevées dans les dalles témoins (de 1 m x 1 m)

Béton à l'état durci

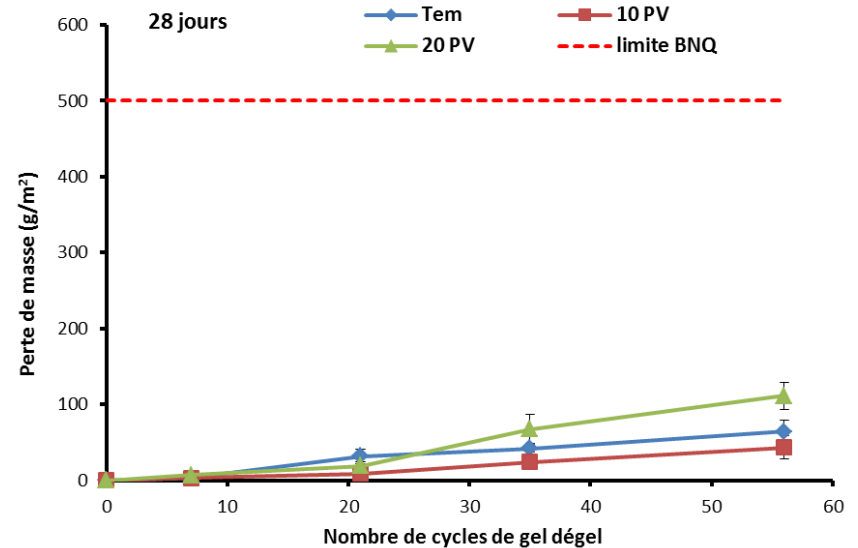
No	Essais	Normes	Échéances
1	Application périodique d'une solution de NaCl à 3,0%	BNQ2621-900	35 - 42 - 56 - 70 - 91 jours - 1 an & 3ans
2	Résistance en compression	CSA A23.2-9C	56 jours - 1 an & 3ans
3	Résistance en traction	CSA-A23.2-13C-09	56 jours - 1 an & 3ans
4	Perméabilité aux ions chlores	ASTM C1202	56 jours - 1 an & 3ans
5	Résistance à l'abrasion	ASTM C779	56 jours - 1 an & 3ans

Résistance à l'écaillage (BNQ 2621-900)

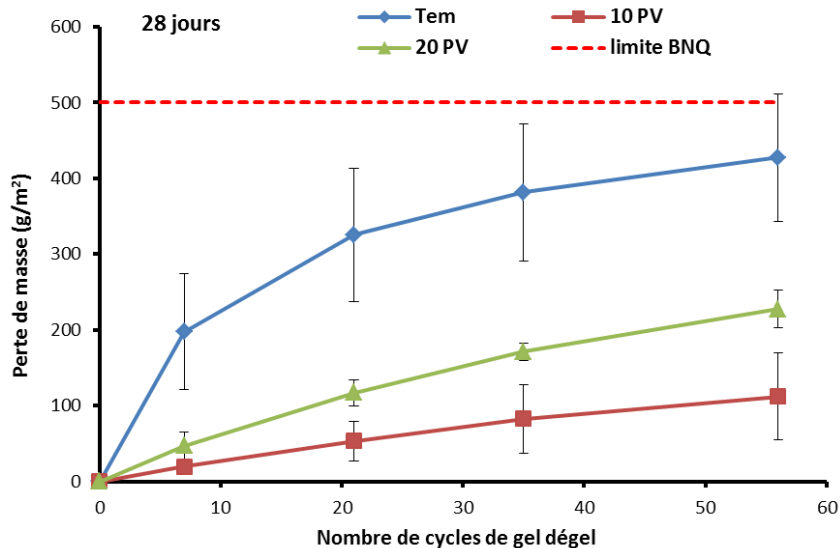
Chantier # 1: Gouin E, Mtl



Chantier # 2: 16è Av., Mtl

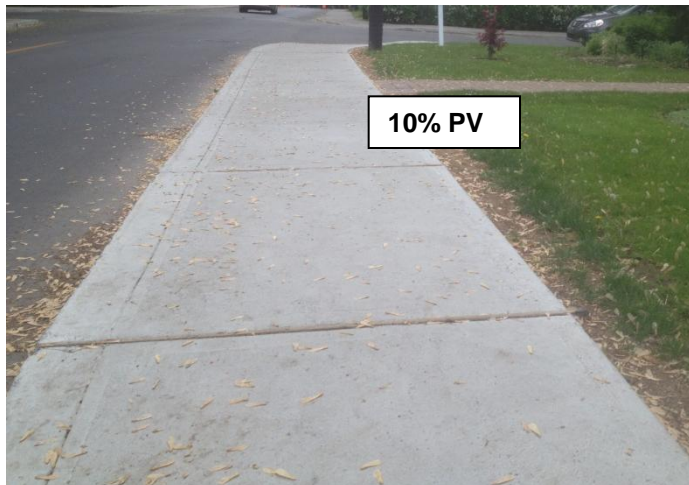
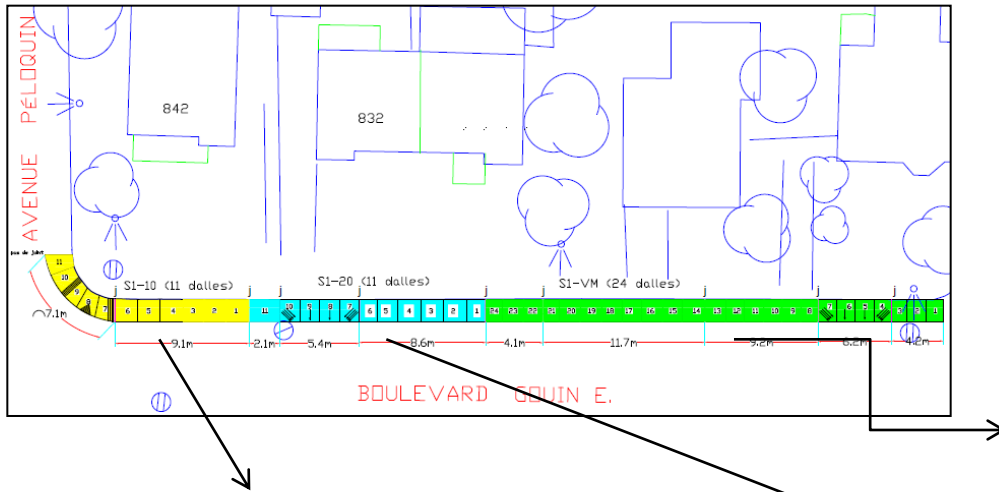


Chantier # 3: Av. Chénier, Mtl



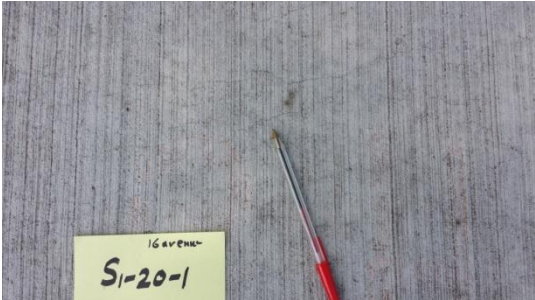
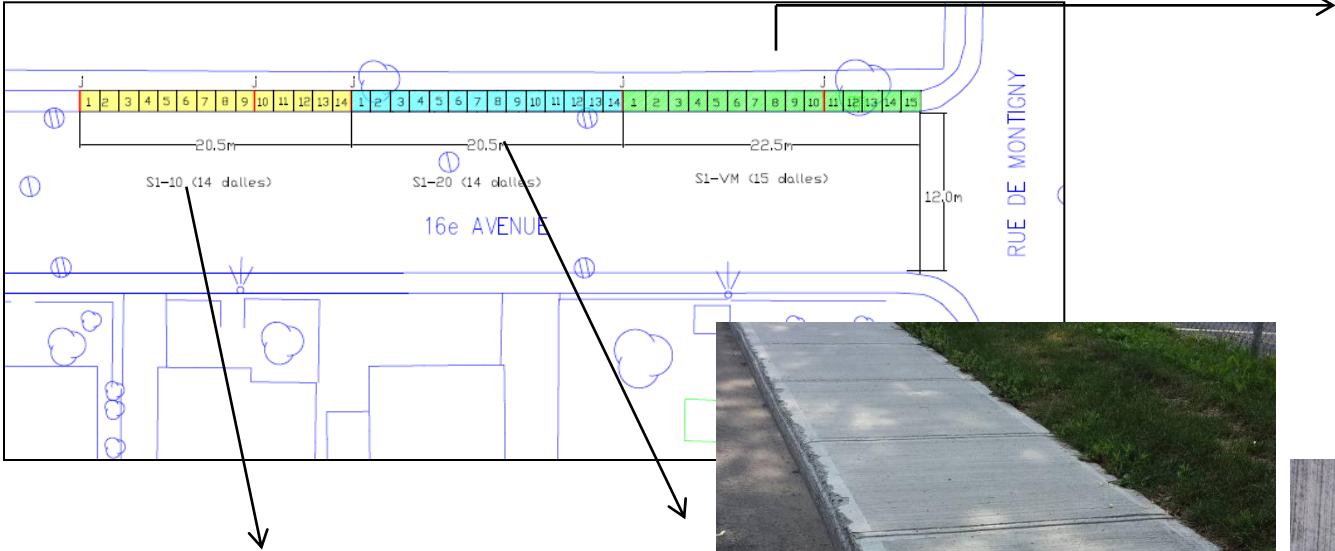
Projets 2014

- boulevard Gouin est - Arrondissement Ahuntsic-Cartierville
- 01 août 2014



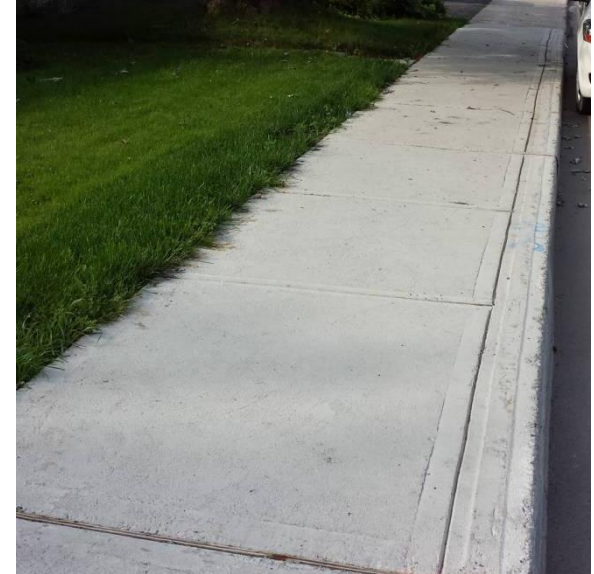
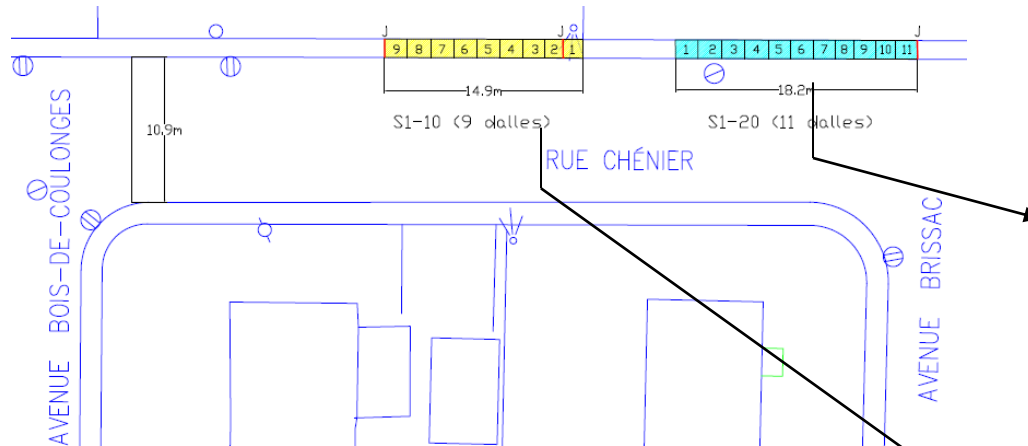
Projets 2014

- 16 ème avenue – Arrondissement RDP-PAT
- 15 août 2014



Projets 2014

- Rue Chénier – Arrondissement Anjou
- 25 septembre 2014



Projets 2014

- Square Cabot 15% PV (début 2014 – fin 2015)



- 55 Kg de poudre de verre par m3
- environ 3 bouteilles de vin / kg
- projet du Square Cabot = 474 m3
- environ **78 000** bouteilles pour le projet

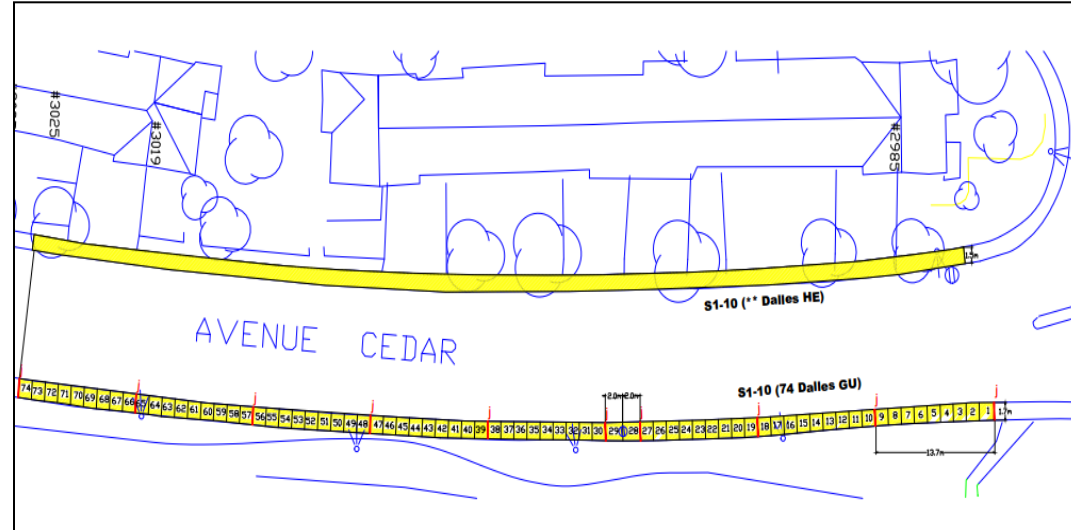
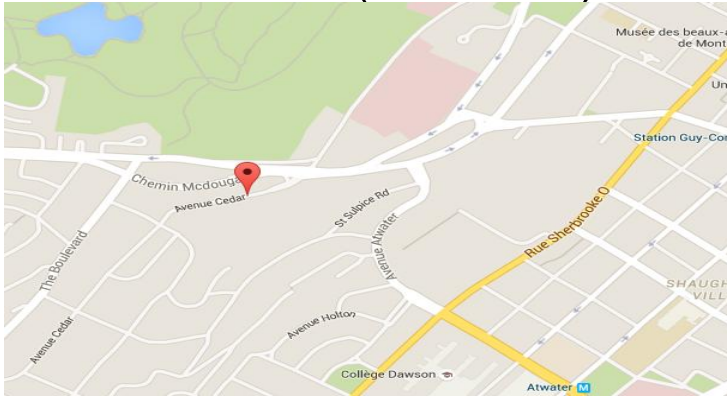
Contenu



- Introduction
- **Projets réalisés à la Ville**
 - Réalisation + Essais/résultats + Suivis
 - 2011 Musée des Beaux Arts de Montréal
 - 2013 Rue Poutrincourt
 - 2014 Boul. Gouin, 16^{ième} avenue, rue Chénier, square Cabot
 - 2015 Rue Cedar
- Projets prévus en 2016
- Conclusions

Projet 2015

- Rue CEDAR, De la rue Ramesay et chemin de la côte-des-Neiges Cabot (4000 m²)



Contenu



- Introduction
- Projets réalisés à la Ville
 - Réalisation + Essais/résultats + Suivis
 - 2011 Musée des Beaux Arts de Montréal
 - 2013 Rue Poutrincourt
 - 2014 Boul. Gouin, 16^{ième} avenue, rue Chénier, square Cabot
 - 2015 Rue Cedar
- Projets prévus en 2016
- Conclusions

Projets prévus en 2016

- 7 projets prévus en 2016
 - Total de 20 400 m²
 - 17600 m² à 10% PV
 - 2800 m² à 15% PV

Contenu



- Introduction
- Projets réalisés à la Ville
 - Réalisation + Essais/résultats + Suivis
 - 2011 Musée des Beaux Arts de Montréal
 - 2013 Rue Poutrincourt
 - 2014 Boul. Gouin, 16^{ième} avenue, rue Chénier, square Cabot
 - 2015 Rue Cedar
- Projets prévus en 2016
- Conclusions

Conclusions

- Propriétés mécaniques; résistances en compression, traction, et flexion avec le béton PV conformes aux exigences de la Ville de Montréal
- Durabilité; excellentes perméabilité aux ions chlores et résistance au gel-dégel
- Les résultats des essais d'écaillage pour les bétons contenant 10% et 20% de PV sont conformes
- Les résultats des essais d'écaillage pour le béton contenant 25% de PV sont non-conformes (contradictoire avec les résultats déjà obtenus au labo et sur d'autres chantiers)

Conclusions

- Les bétons contenant la PV ont une plus grande sensibilité aux conditions de températures que le béton témoin en ce qui a trait à l'écaillage
- Les résultats des essais d'écaillage réalisés à partir des **dalles témoins** maintenues en conditions climatiques réelles;
 - conformes pour les bétons contenant 10% et 20% de PV
 - non-conformes pour le béton contenant 25% de PV
- Pour le moment nous recommandons pour les bétons de trottoirs;
 - Un dosage de 10% de PV lorsqu'un agent de cure est utilisé
 - Un dosage de 15% de PV lorsqu'une cure à l'eau est possible